



Les effets perturbateurs liés au scintillement subliminal des écrans cathodiques sur le contrôle oculomoteur lors du déplacement saccadique des yeux

Christian Michel Lachaud

► To cite this version:

Christian Michel Lachaud. Les effets perturbateurs liés au scintillement subliminal des écrans cathodiques sur le contrôle oculomoteur lors du déplacement saccadique des yeux. Psychologie. 1997. dumas-00424292

HAL Id: dumas-00424292

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00424292>

Submitted on 14 Oct 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Formation Doctorale de Psychologie, Université de Provence,
Faculté des Lettres et Sciences Humaines.

Septembre 1997

Mémoire de DEA en Psychologie Cognitive

Présenté par Mr. Christian LACHAUD

**LES EFFETS PERTURBATEURS LIÉS AU
SCINTILLEMENT SUBLIMINAL DES ÉCRANS
CATHODIQUES, SUR LE CONTRÔLE OCULOMOTEUR
LORS DU DÉPLACEMENT SACCADIQUE DES YEUX.**

(CONTRAT DE RECHERCHE EUROPÉEN "BIOMED 1 PL 920828", Pr. A. KENNEDY)

Sous la codirection de

Pr. Thierry BACCINO, Laboratoire de Psychologie Expérimentale et Quantitative

*Université de Nice - Sophia Antipolis, Faculté des Lettres et Sciences Humaines
98 Bd E. Herriot, BP 209 - 06 204 Nice Cedex 3*

et

Pr. Joël PYNTE, CREPCO - CNRS

*Université de Provence, Faculté des Lettres et Sciences Humaines
29, av. R. Schuman, 13 621 Aix-en-Provence Cedex 1*

Travail ayant inspiré la publication suivante (Baccino, 1999)

<http://www.unice.fr/LPEQ/pagesperso/thierry/Publications/exploring.pdf>

Remerciements:

A toute l'équipe de la section de Psychologie de Nice, étudiant(e)s compris, ainsi qu'aux Aixois, chacun ayant contribué d'une façon ou d'une autre à la réalisation de ce travail.

A Carine et Marc.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1: Revue de question.

A) LA COMPLEXITÉ DU PHÉNOMÈNE:	2
1. APERÇU DE L'ORGANISATION FONCTIONNELLE NEUROMUSCULAIRE SOUS-TENDANT LA PROGRAMMATION DE LA SACCADÉ:	2
2. ORGANISATION DE LA RÉTINE: POURQUOI DES MOUVEMENTS OCULAIRES ?	5
B) LES DIFFÉRENTS ASPECTS COMPORTEMENTAUX DE LA SACCADÉ OCULAIRE: INFÉRENCES SUR SA PROGRAMMATION.	7
1. LES CARACTÉRISTIQUES DES MOUVEMENTS SACCADIQUES DES YEUX:	7
2. COMMENT LA SACCADÉ EST-ELLE PROGRAMMÉE ?	9
3. LA SUPPRESSION SACCADIQUE:	20
C) CONCLUSION:	23

Chapitre 2: Problématique de l'étude.

A) RÉMANENCE DU PHOSPHORE UTILISÉ DANS LES PHOTOPHORES, POLARITÉ D'AFFICHAGE, ET FRÉQUENCE DE RAFRAÎCHISSEMENT DE L'ÉCRAN:	27
1. LA RÉMANENCE DU PHOSPHORE:	28
2. LA POLARITÉ D'AFFICHAGE:	29
3. LA FRÉQUENCE DE RAFRAÎCHISSEMENT DE L'IMAGE AFFICHÉE:	31
B) LES EFFETS SUPPOSÉS DU SCINTILLEMENT SUBLIMINAL SUR LES TRAITEMENTS SENSORI-MOTEURS ET COGNITIFS DE L'INFORMATION VISUELLE:	32
1. SCINTILLEMENT ET DISTORSION DE L'ESPACE PERCEPTIF:	33
2. LES PREMIÈRES OBSERVATIONS EXPÉRIMENTALES: EFFETS SUR LA TAILLE DES SACCADÉS	34
3. QUEL FACTEUR PERTINENT: FRÉQUENCE, OU NOMBRE DE RAFRAÎCHISSEMENTS PENDANT LA SACCADÉ ?	35
C) CONCLUSIONS:	36

Chapitre 3: Méthodologie.

A) ASPECT PRATIQUE DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL:	38
1. DISPOSITIF MATÉRIEL:	38
2. MATÉRIEL ÉVOCATEUR:	40
3. DÉROULEMENT D'UNE PASSATION:	41
B) HYPOTHÈSES, VARIABLES MANIPULÉES ET PLAN D'EXPÉRIENCE:	42
1. HYPOTHÈSES:	42
2. VARIABLES MANIPULÉES:	43
a) Variables indépendantes: caractéristiques de l'image générée par l'écran.	43
b) Variables dépendantes: paramètres de la saccade.	44
c) Variable neutralisée:	44
3. PLAN DE BASE AYANT STRUCTURÉ L'EXPÉRIENCE:	45
C) TRAITEMENT DES DONNÉES:	46
D) ANALYSES EFFECTUÉES:	47
1. ANOVA:	47

a)	Tester les effets de la fréquence de rafraîchissement et de la polarité d'affichage sur les paramètres du contrôle oculomoteur:	47
b)	Tester les effets du nombre de rafraîchissements d'écran survenus durant le mouvement des yeux, sur les paramètres du contrôle oculomoteur:	47
c)	Tester les effets de la localisation intrasaccadique du rafraîchissement de l'écran (par tiers de la totalité du mouvement, en pourcentage de la durée) sur les paramètres du contrôle oculomoteur:	47
2.	ANALYSE DES CORRÉLATIONS:	48
3.	ANCOVA:	48
4.	ANALYSE DES χ^2 :	48

Chapitre 4: Résultats - Discussion.

A)	EFFETS DE LA FRÉQUENCE DE BALAYAGE ET DU NOMBRE DE RAFRAÎCHISSEMENTS INTRASACCADIQUES:	50
1.	DE LA TAILLE:	57
2.	DE LA DURÉE:	59
B)	EFFETS DE LA POLARITÉ D'AFFICHAGE:	71
C)	CONCLUSIONS:	76

Conclusion	75
-------------------	-----------

Bibliographie	78
----------------------	-----------

Annexes	81
----------------	-----------

Données brutes (téléchargement)	82
---------------------------------	----

Tableaux de résultats	83
-----------------------	----

Données complémentaires – polarité négative	87
---	----

Données complémentaires – polarité positive	107
---	-----

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les **écrans cathodiques**, dont l'usage s'est généralisé à la grande majorité de la population occidentale, sont **responsables** d'un certain nombre de **troubles** (maux de tête, fatigue visuelle, chute des performances cognitives, etc.), dont la gravité peut aller jusqu'au syndrome neurologique chez les sujets prédisposés (déclenchement de crises d'épilepsie).

Si les radiations imputables au canon à électrons peuvent être en cause dans une certaine mesure, il apparaît que ce sont surtout les caractéristiques physiques du stimulus lumineux qui induisent un « **stress visuel** ». Leur particularité est de présenter une **variation subliminale de la luminance, ou “scintillement”**, générée par la **fréquence de rafraîchissement de l'image** affichée.

A la différence des objets visuels qui nous parviennent du monde réel, stables et permanents, ceux produits par les tubes cathodiques sont “intermittents”, rafraîchis par chaque passage du faisceau d'électrons, dont la vitesse varie d'un type d'écran à un autre.

Bien que nous apparaissant stables et permanentes, de telles images n'en présentent pas moins un scintillement subliminal, susceptible, par l'intermédiaire des processus sensoriels de la vision, d'altérer les élaborations perceptives, cognitives, mais aussi oculomotrices.

L'étude présentée dans ce document s'attache, à partir d'observations antérieures sur la variabilité des positions de première fixation (PPF) de l'œil dans une chaîne de caractères en fonction de la fréquence de rafraîchissement de l'écran, à **comprendre quels sont les mécanismes du contrôle oculomoteur de la saccade qui sont modulés, et pourquoi il peut être logique qu'il en soit ainsi.**

Chapitre 1

REVUE DE QUESTIONS

Chapitre 1

REVUE DE QUESTIONS**A) LA COMPLEXITÉ DU PHÉNOMÈNE:****1. *Aperçu de l'organisation fonctionnelle neuromusculaire sous-tendant la programmation de la saccade:***

L'évolution de la vision dans le règne vivant a été dans le sens, non pas d'une surspécialisation de l'œil, mais d'une démultiplication des capacités d'analyse au niveau de l'ensemble du cerveau (27).

La vision apparaît comme une totalité sensori-motrice, voire cognitivo-sensori-motrice, puisqu'elle intègre aussi l'oculomotricité, dont la finalité est bien l'amélioration de la perception.

Le mouvement saccadique de l'œil est l'une des catégories de mouvements oculaires, celle qui nous intéresse dans le cadre de cette recherche. Elle est sous-tendue par une organisation fonctionnelle extrêmement complexe, qui fait intervenir (6, 25, 27) :

- deux fois **6 muscles effecteurs** (4 droits, 2 obliques),
- deux fois **3 nerfs oculomoteurs** (nerf III, oculaire commun; nerf IV, pathétique; nerf VI, moteur oculaire externe), commandés par leurs noyaux respectifs, situés dans le tronc cérébral,

- ▷ **l'ensemble du système nerveux central (SNC).** On connaît les structures suivantes pour être tout particulièrement impliquées dans le mouvement saccadique de l'œil:
- **les cortex frontal** (aire 8 ou champ oculaire frontal, impliquée dans l'initiation volontaire des saccades), **pariétal** (aire 7), **temporal supérieur** (aire 39, impliquée dans l'attention dirigeant une saccade volontaire), et **occipital** (aire 19),
 - **le thalamus**, qui informe les aires oculomotrices sur le comportement du regard, mais n'élabore pas le mouvement; il coordonne simplement les signaux de contrôle qui déterminent le début et la fin des tâches,
 - **le cervelet** (vermis dorsal), impliqué dans le traitement des données spatiales d'erreur rétinienne et de position oculaire,
 - différentes **structures du tronc cérébral**:
 - ✧ les **tubercules quadrijumeaux antérieurs** (TQA ou colliculus supérieurs) codent la direction de la saccade, ainsi que l'erreur motrice, variable dynamique correspondant à la différence entre la position de l'œil et la position à atteindre pour placer la cible en vision fovéale,
 - ✧ la **formation réticulaire pontique** (FRP), générateur probable des mouvements d'horizontalité (neurones phasiques créant la commande prémotrice), sous l'impulsion des aires corticales 8 et 39,
 - ✧ les **noyaux périhypoglosses**, responsables de l'intégration mathématique du signal d'accélération en signal de position,
 - ✧ la **substance noire**, impliquée dans le contrôle spatial et temporel de la saccade.

L'ensemble de ces **structures interconnectées** agit **en synergie** pour **l'élaboration du programme** correspondant à la saccade à effectuer. S'il existe un traitement partiellement sériel de l'information, cette dernière semble plus vraisemblablement traitée en parallèle, compte tenu des temps de latence observés.

Les entrées de l'information visuelle dans le SNC ne se font d'ailleurs pas de façon entièrement sérielle (rétine - nerf optique - corps genouillé latéral (CGL)), **puisque'environ 30 % du contingent de fibres provenant de la rétine quittent plus ou moins précocement la bandelette optique avant d'atteindre le CGL, pour se projeter dans différentes structures centrales** (mésencéphale, thalamus, hypothalamus, tectum, colliculus). Il s'agit des **voies optiques secondaires**, dont le **rôle non visuel**, n'est pas toujours bien connu (27).

L'existence d'une **projection rétinotopique de ces fibres sur les TQA** est intéressante, car **une telle organisation laisse sous-entendre la possibilité d'un arc réflexe direct à ce niveau, permettant un rétrocontrôle immédiat de l'évolution du stimulus visuel sur le mouvement de l'œil.**

2. Organisation de la rétine: pourquoi des mouvements oculaires ?

La **géométrie de l'espace rétinien** est **centrée sur la fovéa**, région de 1,5 mm. de diamètre correspondant à la projection de l'image au centre du regard lorsqu'on fixe un objet (19).

Par sa structure, cette zone est extrêmement performante dans la perception des détails et de la couleur (26) :

- elle ne renferme que des cônes (cellules visuelles possédant les pigments nécessaires à l'élaboration du signal de la couleur), sur 0,57 mm. de diamètre,
- elle est exempte de toute irrigation capillaire sur ses 0,4 mm. centraux (absence d'interférences avec la lumière incidente),
- son centre, la fovéola (0,1 mm. de diamètre), ne renferme aucun corps cellulaire, mais uniquement les segments externes des cônes rouges et verts, densément regroupés,
- les champs récepteurs des cellules ganglionnaires rétiniennes y sont très réduits.

Une telle organisation implique un échantillonnage très important de l'image, ce qui permet une acuité maximale en vision fovéale, avec une précision de l'ordre du diamètre d'un cône (2,5 $\mu\text{m}.$), et rend possible la distinction de 2 points séparés par un angle de 0,5' dans le champ visuel (13).

Aussitôt que l'on s'éloigne du centre de la fovéa (et déjà à l'intérieur de la zone fovéolaire), l'acuité chute rapidement, proportionnellement aux modifications structurales que subit la rétine vers la périphérie (13) :

- les cônes se raréfient, remplacés par des bâtonnets,
- la densité des photorécepteurs diminue,
- les champs récepteurs des cellules ganglionnaires périphériques mettent en œuvre de plus en plus de photorécepteurs, avec pour conséquence une augmentation de leur diamètre (qui peut atteindre et dépasser 1° stéradian).

Par conséquent, l'acuité est moins bonne en périphérie, mais compensée par (23) :

- ▷ des capacités accrues de détection du mouvement et d'apparition d'un stimulus dans cette partie du champ visuel,
- ▷ **l'existence des mouvements oculaires**, dont le **but** est de **positionner** ou de **stabiliser** une **cible sur la fovéa**.

B) LES DIFFÉRENTS ASPECTS COMPORTEMENTAUX DE LA SACCADÉ OCULAIRE: INFÉRENCES SUR SA PROGRAMMATION.

1. *Les caractéristiques des mouvements saccadiques des yeux:*

Dans l'espèce humaine, les yeux sont mobilisés de façon étroitement synchronisée (19). On rencontre **différents types de mouvements**, résultant d'une réponse adaptée à la localisation de la cible dans l'espace rétinien (27) :

- ▷ mouvements de **vergence** (disparité rétinienne entre les 2 yeux),
- ▷ mouvements de **poursuite** (cible proche de la fovéa, se déplaçant),
- ▷ **micromouvements** adaptatifs de la vision (nystagmus optocinétique, micro-saccades de fixation, etc. Il s'agit des mouvements les plus rudimentaires),
- ▷ **mouvements saccadiques** (position excentrée du stimulus). Ce sont les mouvements les plus sophistiqués, tout spécialement les saccades à la commande, tête droite, que réalisent nos sujets d'expérience.

Que les saccades soient volontaires ou réflexes, elles présentent toujours les mêmes **caractéristiques dynamiques** (19) :

- ▷ **latence de déclenchement**: variable selon le type de saccade (100 ms. pour les saccades express et pour les saccades de refixation, environ 200 ms. pour les saccades premières) et la position du stimulus (la latence est peu modifiée pour des excentricités de 1 à 20°, mais elle augmente pour des excentricités plus importantes que 20°, ou plus petites que 1°. Dans ce dernier cas se produirait un conflit entre le traitement cognitif de l'information, réalisable près du centre, et le manque de précision, malgré tout, dans l'acuité. Cette ambiguïté est d'ailleurs levée avec la disparition du repère de fixation lors de la présentation de la cible),
- ▷ **durée**: selon la taille de la saccade, de 20 à 150 ms. (6),

- ▷ **vitesse:** elle dépend de la taille de la saccade. Les vitesses instantanées maximales (de l'ordre de 700 à 800°/ sec.) ne s'observent pas pour de petites saccades. Il existe une relation stable entre vitesse instantanée, vitesse moyenne, et amplitude. La vitesse varie peu en fonction de la direction,
- ▷ **mode d'exécution et précision:** les petites saccades s'ajustent directement à la cible. Les grandes sont compensées dans leur imprécision par une saccade corrective (100 % de refixations pour une visée de 20° d'excentricité. Le champ moteur habituellement utilisé est de 15 à 20°). Il existe une tendance à surestimer systématiquement les distances de rotation des yeux, liée en partie à l'organisation de la rétine périphérique. Au-delà d'une certaine limite, des mouvements réflexes de la tête et du buste interviennent,
- ▷ **adaptabilité:** lorsque l'ajustement d'une saccade est mis en défaut de façon systématique et répétitive (par exemple, la cible est rapprochée du point de départ durant la saccade), il se produit avec l'entraînement une adaptation non permanente de la taille des saccades, à rapprocher d'un phénomène d'habituation.

2. Comment la saccade est-elle programmée ?

Les observations ont permis de définir une **programmation gérée par 2 modules** qui seraient distincts, l'un impliqué dans le **calcul d'amplitude** (système spatial et spatio-temporel, baptisé "**système où**"), l'autre dans la **décision de déclenchement de la saccade** (système temporel, baptisé "**système quand**").

Cette présentation simplifiée du phénomène découle des travaux de **Becker et Jürgens**, qui cherchaient à savoir "quand" est programmée la saccade qui va "où" afin de **démontrer l'existence d'un certain parallélisme dans le traitement de 2 saccades évoquées successivement** (4).

Par conséquent, le "quand" initial de Becker et Jürgens apparaît plutôt comme un "comment" (les saccades sont-elles programmées en parallèle, en série, ou de façon plus ou moins mixte ?).

Les **modèles classiques (programmation sérielle stricte)** considèrent que le système de préparation de la saccade entre dans une période réfractaire une fois sa tâche accomplie, correspondant à la durée d'effection de la saccade additionnée du temps de latence nécessaire à l'élaboration du programme de la saccade suivante.

Becker et Jürgens (1979) ont montré l'existence d'une **programmation partiellement parallèle** des saccades dans des expériences faisant intervenir un **paradigme de double déplacement de cible**:

une première cible est présentée au sujet à une position 1, puis déplacée à une position 2 plus excentrée (ou moins) avant que le sujet n'exécute la saccade évoquée par la position 1.

Deux types de réactions s'observent alors:

- ▷ lorsque le déplacement de la cible a lieu suffisamment de temps avant le début de la saccade, celle-ci est modifiée de façon à prendre en considération la nouvelle position du stimulus (la saccade arrive dessus). Ce résultat doit être modulé en fonction du sens de décalage de la cible par rapport au point de fixation initial: l'amplitude d'une saccade peut être raccourcie par une nouvelle information située sur la trajectoire, tandis que sa prolongation au-delà du point d'arrivée initialement programmé apparaît impossible.
- ▷ lorsque le déplacement de la cible est fait plus tardivement, l'amplitude de la saccade ne tient compte que de la position initiale du stimulus.

La latence de cette seconde saccade est variable. Elle augmente proportionnellement à la diminution du temps qui sépare le décalage de la cible et la fin de la première saccade, autrement dit, du temps qu'il reste au système oculomoteur pour programmer une autre saccade en parallèle à l'effection de la première.

Le traitement d'une saccade serait modulaire et sériel¹, car les modules de début de chaîne, une fois libérés de leur tâche vis à vis de la première saccade, pourraient débiter la programmation de la saccade suivante, alors même que les modules de fin de chaîne terminent celle de la saccade précédente.

Ainsi, il y aurait de la sérialité dans l'enchaînement des traitements d'une saccade, mais pas obligatoirement entre les traitements de 2 saccades successives (chevauchements impliquant du parallélisme).

¹ Il s'agit de considérations fonctionnelles. La réalité neuronale est sans doute moins simple.

Morisson (1984) a montré, sur la base de matériel psycholinguistique, que si le traitement parallèle des saccades successives semble bien être le cas le plus fréquent, leur programmation sérielle stricte (1 à 1) existe également sous certaines conditions: dans la lecture, par manque de contraintes contextuelles (diminution de la perceptibilité parafovéale, difficultés de compréhension du texte, non familiarité avec les mots, etc.). Cependant, la lecture est un phénomène particulier, dans lequel n'intervient pas seulement du "perceptif", mais aussi du "cognitif".

▷ **Le “système où”:**

Il apparaît composé de 2 procédures d'intégration, chargées du traitement de 2 catégories d'informations:

- ***Codage de l'information spatiale:***

L'amplitude de la saccade peut être modulée par l'**apparition** d'un nouveau stimulus dans le champ visuel **avant le déclenchement de la saccade** (cf. Becker et Jürgens, 1979). Plus exactement, le programme moteur en élaboration semble pouvoir être modifié de façon à adapter la position de l'œil sur la nouvelle position de la cible, **à condition que celle-ci soit sur la trajectoire**, et s'y trouve **suffisamment de temps avant le déclenchement** de la saccade pour être prise en compte. Par contre, **une fois établi, ce programme ne semble plus être modifiable**.

Les modalités de fonctionnement du système d'intégration spatiale ont été affinées par des études ultérieures, utilisant des stimuli complexes, plus proches du monde réel que ne le sont les cibles expérimentales simplifiées ou les mots (Deubel, Wolf et Hauske, 1984).

Il est classiquement supposé que les entrées visuelles déclenchant une saccade correspondent à l'**erreur rétinienne**, plus ou moins confondue avec la position du stimulus dans le champ visuel en cas de stimulus simples (point, rayure, etc.). Dans la réalité, un tel signal doit être dégagé de la complexité de la cible et de celle de l'environnement, ce qui sous-entend un **prétraitement spatial de l'information visuelle, de nature catégorielle** (10).

Ce prétraitement serait **réalisé dans des canaux parallèles organisés rétinotopiquement**, qui conduisent à l'élaboration d'un signal spatialement distribué. L'amplitude de la saccade serait alors déterminée par un processus d'intégration des informations visuelles pondérées par l'excentricité rétinienne, qui aboutit à la **genèse d'un signal d'erreur oculomotrice** (10).

Les expériences de ces chercheurs (10) ont montré que **le système oculomoteur se comporte avec les cibles complexes comme s'il en calculait un centre de gravité**, fondé sur le poids en surface apparente, luminosité, et excentricité (ou répartition dans l'espace) de leurs éléments constitutifs, comme facteurs d'égale importance. Cet **effet de globalité** s'apparente fortement aux théorisations gestaltistes sur la construction du percept.

Findlay (toujours selon les mêmes auteurs) fait cependant remarquer que le but de la saccade tend à être plus proche du stimulus qui se situe le plus près de la fovéa, impliquant une **déviations du centre de gravité sous l'influence d'une pondération plus importante des éléments situés en vision centrale**. Cet effet, serait lié à des phénomènes de **magnification corticale** (9), mais pourrait aussi dépendre, en partie, d'influences volontaires liées à la signification du stimulus (processus cognitifs de reconnaissance des motifs). Il ne doit pas être confondu avec le "range effect" (15), qui se traduit par une sous-évaluation des petites distances et une surévaluation des distances importantes (retrouvé pour la saccade aussi bien que pour une réponse manuelle d'évaluation).

Dans la lecture, il existe un phénomène de **déviations systématique du point d'arrivée de l'œil dans une chaîne de caractères sur la gauche** (par rapport au centre de gravité), qu'il s'agisse de saccades progressives (sous-évaluation des distances ?) ou régressives (surévaluation ? Cf. Range effect). Cette position préférentielle, dite **position de première fixation** (PPF), aurait pour conséquence de **faciliter la prise d'informations**, et donc les traitements cognitifs qui en découlent (on observe un rallongement des temps de décision et de dénomination lexicale de 20 ms environ par caractère, en cas de décalage de la PPF). (24)

Les résultats de la présente étude montrent que cette PPF peut aussi varier significativement en fonction de la fréquence de rafraîchissement de l'écran, traduisant l'existence de procédures dynamiques d'intégration spatiale et temporo-spatiale à l'origine de ce phénomène.

- ***Codage de l'information temporo-spatiale:***

Les mêmes auteurs (10) ont démontré l'existence de processus d'intégration temporo-spatiale des stimuli visuels, **lorsque les différents sites réiniens sont séquentiellement stimulés au cours de la programmation de la saccade**, en s'inspirant du paradigme de double déplacement de cible proposé par Becker et Jürgens (1979).

Leur protocole expérimental consistait à présenter une cible à 10-15° d'excentricité. L'apparition de la saccade ainsi évoquée déclenchait un déplacement de la cible de 2°, afin d'évoquer une nouvelle saccade, suivi, après une durée variant aléatoirement de 0 à 200 ms., par un décalage momentané (de 30 à 45 ms.) de cette même cible à ± 2 ou 3° (ce décalage se produit donc pendant la programmation de la saccade corrective, soit lors de l'effection de la première saccade, soit pendant la fixation qui fait suite).

Pour un décalage survenant:

- ✧ **70 ms. (au plus) avant le déclenchement de la saccade corrective**, cette dernière tombe sur la position cible initiale,
- ✧ **entre 70 et 180 ms. avant le déclenchement**, la saccade tombera sur une position intermédiaire entre les deux cibles, avec une proximité plus importante du stimulus décalé pour des présentations survenant entre 110 et 150 ms. L'œil ne tombe pourtant jamais exactement sur la position décalée du stimulus.
- ✧ **entre 180 et 240 ms. avant la saccade corrective**, une inversion de l'effet est observée (maximale entre 200 et 220 ms.), l'œil arrivant en-deçà de la position initiale de la cible, c'est à dire correspondant à une zone où la cible ne s'est jamais trouvée. Ce phénomène paraît surprenant, et les auteurs n'en donnent aucune explication. Sur la base des résultats précédents, on peut cependant supposer qu'il s'agit d'un puissant phénomène d'intégration des données spatiales et temporo-spatiales les unes relativement aux autres.

La modulation de la position de la cible décalée survenant entre 180 et 240 ms. avant le déclenchement du mouvement de correction, signifie que le double décalage apparaît en premier, ou après une très courte durée de présentation du décalage simple, dans la période de latence de cette saccade corrective:

- ✧ Lorsqu'il apparaît en premier, il survient plutôt vers la fin de l'effection de la première saccade. L'œil tombe alors sur une position correspondant au simple décalage, comme si le système oculomoteur n'avait pas pris en considération la modulation.
- ✧ L'inversion se produit surtout entre 200 et 220 ms., c'est à dire lorsque la position simple-décalée est apparue en premier durant la période de latence, pendant un minimum d'environ 20 ms. Ce qui laisserait supposer que la programmation du mouvement ne tient pas compte de cette première localisation.

Le système oculomoteur semble donc se comporter **comme s'il intégrait dans son calcul d'amplitude les éléments les plus saillants qui se sont produits** ("pondérés" par leur aspect saillant ?), **pour en réaliser une moyenne**. Dans le cas présent, ces éléments saillants sont la position la plus longtemps occupée par le stimulus et son mouvement de retour de la position double-décalée à la position décalée. Par contre, la position double décalée ne semble pas être prise en considération, ou l'est de façon minimale.

Un **autre mécanisme d'évaluation temporo-spatiale** se basant sur une **interaction entre les informations visuelles pré et post-saccadiques** a pu être mis en évidence par les mêmes auteurs, grâce à **l'utilisation de cibles hypercomplexes**, dont la modification est impossible à percevoir sans une analyse consciente de quelques secondes (10).

Le décalage de telles cibles, déclenché par l'apparition d'une saccade, conduit à une correction involontaire et automatique de l'erreur de positionnement par une seconde saccade de très courte latence.

Même si l'on pensera, face à ce phénomène, à la mise en œuvre d'un arc réflexe sensori-moteur mobilisant un circuit neuronal court entre rétine et tronc cérébral, il faut rappeler que des processus centraux de calcul prévisionnel sur la position de la cible rentrent peut-être en ligne de compte. On sait en effet que le cerveau ne poursuit pas une cible en mouvement, mais prédit sa position future, et poursuit une représentation interne de sa trajectoire prédite (1).

Ainsi, le **“système où”** représenterait un **processus intégratif très performant**, capable de prendre en considération:

- ✧ **La configuration spatiale d'un stimulus dans son ensemble**, pour des cibles complexes, sur la base d'éléments définis comme saillants par le système lui-même.
- ✧ **Son évolution dynamique au cours de la programmation d'une saccade.**
- ✧ **Les modifications de sa configuration spatiale lors de l'effection de la saccade, par comparaison non perceptive** (phénomène sensori-moteur de nature réflexe) **des états pré et post-saccadiques du stimulus.**

Les travaux présentés dans cette section poussent donc à penser que le programme de la saccade n'est plus modifiable une fois le mouvement déclenché. Ce dernier aurait donc un caractère totalement irrépressible et balistique.

➤ **Le “système quand”: processus attentionnels ou décisionnels (probabilistes) de déclenchement de la saccade oculaire ?**

Il a été avancé l'idée que l'**attraction de l'attention vers une cible**, ou son déplacement volontaire, étaient **responsables du déclenchement du programme moteur** (ou de la facilitation de sa mise en œuvre), et donc **de la saccade oculaire** (Posner, *théorie de l'attention visuo-spatiale*, 1980, reprise dans différents travaux). (11)

Il semble en effet que le désengagement de l'attention du point de fixation, et son réengagement sur une nouvelle cible, facilite l'apparition d'une saccade.

L'attention pourrait donc avoir un rôle déclenchant, tandis que les déterminants spatiaux ou temporo-spatiaux seraient élaborés plus ou moins indépendamment.

En 1995, **Carpenter et Williams** ont proposé un **modèle purement mathématique du déclenchement de la saccade**, fondé sur les variations qui s'observent dans les temps de latence d'un essai à l'autre en conditions standardisées. De telles variations restent inexplicables en termes de délai synaptique ou de vitesse de conduction de l'influx nerveux.

Ce modèle se dispense de faire intervenir des facultés supérieures comme l'attention, en postulant que **la variabilité des latences représenterait le temps nécessaire au système oculomoteur pour décider de la présence ou non d'une cible**, et déclencher une saccade. Ainsi, le “système quand” ne serait pas attentionnel à la base (pouvant cependant le devenir sous l'influence de la volonté du sujet), mais uniquement décisionnel, ou plutôt, probabiliste: **le signal de déclenchement correspond ici à une estimation neuronale probabiliste de la présence d'une cible** ².

² La probabilité L de vérifier une hypothèse H_1 (il y a une cible) relative à l'hypothèse de référence H_2 , est modifiée sur la base d'une observation E pour conduire à une probabilité réactualisée L' . L'effet de l'observation est de modifier le logarithme de la probabilité L d'une valeur S , qui représente le renforcement de H_1 contre H_2 :

$$\log(L') = \log(L) + S, \text{ avec } S = \log(\text{proba}(E|H_1) / \text{proba}(E|H_2))$$

L'apparition d'une cible déclenche, dans une unité décisionnelle, un signal dont l'intensité croît linéairement dans le temps avec un taux r , depuis sa valeur initiale s_0 jusqu'à un seuil déclenchant θ de valeur fixe. s_0 est modulable, et semble dépendre de nombreux facteurs, puisqu'il intègre la probabilité d'apparition de la cible dans une portion du champ visuel sur la base des essais précédents. Lorsque sa valeur diminue (probabilité plus faible), la latence de la saccade augmente.

Si l'estimation de la probabilité est élevée, le niveau du signal de décision sera plus proche du seuil de déclenchement θ , et mettra moins de temps pour l'atteindre (la latence de la saccade sera alors diminuée).

θ et r sont supposés constants. Seul s_0 a été testé sur la base d'une diminution ou d'une augmentation de la probabilité d'apparition des cibles par entraînement, mais on peut supposer que θ pourrait varier aussi, notamment selon le niveau de vigilance des sujets.

Les auteurs obtiennent 2 catégories de saccades, selon leur latence:

- ✧ normale (90 à 95 % de la distribution)
- ✧ courte (saccades express, 5 à 10 %).

Étant donné que leur protocole ne laissait aucune place à la possibilité d'une préprogrammation des saccades, comme c'est le cas avec le paradigme de double présentation de cible dans les études sur le "système où", ils en ont déduits, en s'inspirant des connaissances anatomiques et neurologiques, l'existence de **2 unités décisionnelles différentes, mettant en jeu des voies neuronales distinctes**:

- ✧ Les saccades à latence normale impliqueraient le cortex pariétal et le champ visuel frontal.
- ✧ Les saccades express mobiliseraient le cortex visuel et les tubercules quadrijumeaux antérieurs; elles résulteraient donc de la mise en œuvre d'une voie réflexe qui ne fait pas intervenir de traitements supérieurs (leur durée est 2 fois moindre).

Il est possible de se demander, cependant, si le signal probabiliste de déclenchement de la saccade résulte bien de traitements séparés des procédures d'intégration spatiale (et/ou temporo-spatiale) effectuées par le "système où". **Il pourrait en effet correspondre à une intensité suffisante qu'atteint le signal d'intégration spatiale** (et/ou temporo-spatiale) à un certain moment du processus. Si tel était le cas, "système où" et "système quand" seraient bien plus fondamentalement imbriqués l'un dans l'autre que ne le supposent les modèles théoriques.

3. *La suppression saccadique:*

En dépit du mouvement incessant de nos yeux, le monde réel continue à nous apparaître stable. **Tout se passe comme si nous ne percevions pas ce qui est sensorialisé par la rétine dans les déplacements du champ visuel provoqués par les mouvements des yeux.** Cette non prise en compte a été appelée **suppression saccadique**. Elle se retrouve à la fois pour la vision périphérique et pour la vision centrale.

Plusieurs hypothèses sont avancées pour rendre compte de ce phénomène (21, 29) :

- ▷ **L'image rétinienne de la cible formée au cours du mouvement est inhibée par l'image qui se forme durant la fixation qui suit (masquage latéral par méta-contraste).**
- ▷ La suppression saccadique résulte d'un **effet de brouillage lié à l'augmentation du bruit de fond rétinien dû au mouvement**. Le bruit est tel que le système visuel n'en extrait plus aucun signal (la suppression maximale se produit effectivement pour des flashes dont la longueur d'onde et la luminance sont proches de celles du fond).
- ▷ On suppose que **des phénomènes centraux sont impliqués dans le phénomène**, puisqu'il commence avant le mouvement de l'œil pour se terminer légèrement après sa fin (par exemple, l'excitabilité de certaines cellules diminue dans le tractus optique, le noyau géniculé latéral et le cortex visuel chez un chat dont l'œil est immobilisé, lorsque c'est l'environnement qui est déplacé. Ou encore, chez les sujets humains, la perception du déplacement de la cible pendant le mouvement de l'œil ne se fait qu'après la saccade (14)).

En réalité, plusieurs études ont montré que (Matin, 1974; Becker, Kieffer et Jürgens, 1987; Verfaillie et coll., 1994; Wilkins, 1995):

- ▷ **nous ne sommes pas aveugles pendant les mouvements de nos yeux**
- ▷ **une stimulation visuelle délivrée après le déclenchement d'une saccade peut modifier la trajectoire de celle-ci:** interruption, ou perturbation (diminution de l'amplitude, durée augmentée).

La perception d'un stimulus lumineux apparu pendant la saccade dépend étroitement de la durée de présentation de cette nouvelle cible: un point lumineux apparaîtra plus ou moins déformé en trait orienté dans la direction du mouvement, selon sa durée de présentation (30). Ainsi:

- ▷ **quand cette durée augmente, la longueur de la déformation augmente en proportion jusqu'à un maximum de temps de présentation de 20 ms,**
- ▷ **si l'augmentation continue au-delà de 20 ms, la taille de la déformation diminue paradoxalement,**
- ▷ **pour une durée de présentation égale à celle de la saccade, la déformation disparaît totalement.**

Matin (1974) rapporte une expérience comparable, dans laquelle un trait lumineux vertical sur fond noir représente le stimulus affiché durant la saccade. Il est perçu comme une tache dont la longueur varie proportionnellement à la durée du flash, à condition que le stimulus soit éteint avant la fin de la saccade.

Si le flash se poursuit un peu après l'arrêt de la saccade, la tache apparaît comme tranchée à l'une de ses extrémités, d'autant plus fortement que dure la stimulation post-saccadique.

Aucune tache n'est perçue, même avec des luminances de présentation très fortes, lorsque la durée post-saccadique est supérieure à 100 ms. (le stimulus apparaît alors comme s'il était présenté à l'œil fixe).

Par conséquent, **la suppression saccadique ne serait pas due au mouvement, mais au masquage latéral par méta-contraste** (ce terme fait principalement référence à une information codée en luminance).

Une telle **adaptation**, permettant d'empêcher la perception de la tache produite par le déplacement de l'œil, aurait pour **but d'aider à maintenir la constance de la direction du mouvement**.

Ainsi, le système oculomoteur serait parfaitement adapté pour **l'optimisation de la perception**:

- ▷ lorsque rien ne change dans l'environnement durant la saccade, ce qui est sensorialisé pendant le mouvement n'est pas injecté dans le percept en élaboration; l'image composée avant la saccade est remplacée par celle créée après.
- ▷ lorsqu'une modification a lieu, la perception du nouvel état du stimulus peut se faire durant le mouvement même, peut-être dans le but d'attirer (ou par l'attraction) l'attention du sujet.

Ces résultats montrent en tout état de cause que nous ne sommes pas aveugles durant la saccade, ce qui implique à plus forte raison que les processus sensoriels à la base du contrôle oculomoteur ne sont pas altérés.

La suppression saccadique doit par conséquent être plutôt envisagée et comprise comme une adaptation de nature perceptive qu'uniquement sensorielle.

C) CONCLUSION:

L'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre laisse paraître peu d'indices sur la possibilité d'une modification du programme moteur saccadique, une fois celui-ci établi et déclenché. **La saccade oculaire serait donc, dans son ensemble, un mouvement balistique et irrépressible.** Toutefois, le but des travaux cités étant surtout de rendre intelligible le processus de programmation des saccades oculaires, a conduit les auteurs à exclure de leurs investigations la recherche de phénomènes de modulation "en vol".

Il existe au moins trois indices qui laissent quand même penser que des possibilités d'ajustement plus ou moins fin du mouvement, de nature vraisemblablement sensori-motrice, peuvent être à l'œuvre dans certaines conditions:

1. **L'organisation des voies optiques secondaires offre la possibilité d'un arc réflexe immédiat entre sensorialité visuelle et motricité oculaire,** puisqu'un contingent de fibres rétinienne se projette directement et rétinotopiquement sur les tubercules quadrijumeaux antérieurs, liés eux-mêmes aux muscles effecteurs de l'œil.
2. **L'aspect fonctionnel de la sensorialité rétinienne reste intact durant les saccades,** puisque, sous certaines conditions, la suppression saccadique étant annulée, il est possible au sujet d'avoir une perception de l'évolution de son champ visuel.
3. **le fonctionnement du "système où", et plus particulièrement des procédures d'intégration temporo-spatiales, montrent comment l'élaboration du programme moteur prend en considération l'aspect dynamique du champ visuel.** Il s'agit d'une indication supplémentaire sur les traitements visuo-moteurs, n'étant pas exclu jusqu'à preuve du contraire que ceux-ci puissent être à l'œuvre lors de la saccade et influencer le mouvement.

Ces trois points justifient à eux seuls une investigation dans le domaine qui nous intéresse. Dès lors, **rien ne nous empêche de supposer que la saccade oculaire puisse être modulée ou perturbée par un champ visuel instable ou en évolution rapide,** en dehors de toute perception par le sujet.

Chapitre 2

PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE:

**LES EFFETS PERTURBATEURS LIES AU SCINTILLEMENT SUBLIMINAL
DES ÉCRANS CATHODIQUES, SUR LE CONTRÔLE OCULOMOTEURS LORS
DU DÉPLACEMENT SACCADIQUE DES YEUX.**

Chapitre 2

PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE:

LES EFFETS PERTURBATEURS LIÉS AU SCINTILLEMENT SUBLIMINAL DES ÉCRANS CATHODIQUES
SUR LE CONTRÔLE OCULOMOTEUR LORS DU DÉPLACEMENT SACCADIQUE DES YEUX.

Il est incorrect de parler de flicker ou de scintillement en relation avec les écrans (mais j'emploierais quand même le terme Français).

En effet, le type d'instabilité que présente l'image n'est pas une alternance d'états allumé-éteint, mais, pour la plupart des écrans cathodiques, **un balayage ligne par ligne, de gauche à droite, et de haut en bas, par un faisceau d'électrons** dont la vitesse dépend de la fréquence de rafraîchissement de l'image (en Hz., correspondant à son nombre de passages par seconde en un même point).

Celui-ci **vient frapper** l'écran, recouvert intérieurement d'**une couche de photophores** constitués de phosphore, **qui s'illuminent alors**.

A) RÉMANENCE DU PHOSPHORE UTILISÉ DANS LES PHOTOPHORES, POLARITÉ D’AFFICHAGE, ET FRÉQUENCE DE RAFRAÎCHISSEMENT DE L’ÉCRAN:

Ces 3 facteurs représentent les déterminants physiques du stimulus subliminal surimposé aux images affichées.

Rémanence et fréquence jouent sur l’intensité du scintillement.

La polarité conduit à localiser le scintillement dans le fond de la page ou dans les caractères du texte, ce qui définit 2 types possibles de conflits pour le système oculomoteur.

Il faut rajouter à ces facteurs, intrinsèques à l’image affichée, une variable dynamique liée à la vitesse de déplacement des yeux, qui de plus n’est pas constante au cours du mouvement. Elle entre effectivement en interaction avec les caractéristiques propres de l’image lors de sa projection au niveau rétinien.

1. La rémanence du phosphore:

La rémanence du phosphore (durée d'illumination résiduelle des photophores après passage du faisceau d'électrons) permet de définir un **index de scintillement de l'écran: moins le phosphore est rémanent, plus l'index tend vers 1,0**. Il s'agit d'un des facteurs importants dont les constructeurs doivent tenir compte pour l'ergonomie de leurs produits (18).

Les caractéristiques physiques du stimulus "scintillement" varient considérablement entre un phosphore à faible rémanence et un phosphore à rémanence importante:

- ▷ **Rémanence courte** (exemple: un phosphore de type P₄ atteint une luminosité de 1% en 0,9 ms. - index voisin de 1): **l'écran s'éteint presque immédiatement après passage du faisceau** (3, 18). On a alors une **variation lumineuse en onde carrée**, se traduisant par le **défilement vertical d'une bande horizontale claire sur un écran noir** (polarité positive), **ou de caractères approximativement scintillants** (polarité négative).

- ▷ **Rémanence longue** (phosphore type P₃₉, atteignant une luminosité de 1 % en 1 300 ms. - index proche de 0,1): **l'écran ne s'éteint jamais entre 2 passages du faisceau**. Il se produit une **diminution progressive de la luminance selon une courbe de relaxation**, ravivée par le passage suivant (3, 18). Ainsi, le stimulus généré est une **bande claire qui défile sur un fond lumineux non homogène et plus sombre** (polarité positive), **ou des caractères brillants présentant une pulsation** (polarité négative).

L'étude que nous avons menée utilise un écran à phosphore P₂₂, qui perd 99% de sa luminance en 16 ms (3).

2. La polarité d'affichage:

Elle définit le type d'instabilité auquel est confronté le système sensori-moteur visuel.

L'image de caractères affichés en **polarité négative** qui va se former **sur la rétine** lors de la saccade sera étirée dans la direction du déplacement de l'œil et en sens opposé; elle présentera une discontinuité correspondant à la variation en luminance des cibles affichées, plus ou moins importante selon la fréquence de rafraîchissement et le type de phosphore utilisé, mais aussi, la vitesse de la saccade; de plus, l'étirement de la cible ne sera pas constant: il varie dynamiquement lui aussi en fonction de la vitesse de l'œil et de son évolution.

Si l'on supposait la vitesse constante, on aurait approximativement un stimulus qui se dessine de la façon suivante sur la rétine:

- ▷ **pour un P₄**, avec une fréquence x , dans le cas d'une saccade à gauche (la zone du dessin la plus sombre correspondant à la zone réelle la plus lumineuse):



- ▷ **pour un P₃₉** (mêmes conditions que précédemment):



Dans le cas d'un affichage en **polarité positive**, la cible est la seule partie de l'écran qui n'est pas "allumée", c'est à dire qu'elle est stable. Par contre, le fond présente une variation spatiale et temporelle de sa luminance (existence d'un mouvement), une perturbation supplémentaire pouvant ainsi être à envisager, due au déplacement du fond par rapport à l'immobilité de la cible ³. Là encore, l'effet va être différent selon le type de phosphore qui est utilisé, et selon la vitesse de rafraîchissement. Dans le cas d'un phosphore P₄, la cible sera visible de façon intermittente, lorsque l'écran est allumé autour d'elle (on peut supposer que le cerveau reconstruit la permanence de la cible lorsqu'il élabore la perception, mais le système sensori-moteur visuel n'est sans doute pas doté de procédures de traitement de l'information suffisamment élaborées pour le faire), et les bandes de défilement seront non homogènement plus ou moins obliques sur la rétine, en fonction de la vitesse de l'œil.

On voit donc que les stimuli subliminaux surimposés aux images générées par les écrans cathodiques représentent un ensemble d'éléments d'autant plus complexe que l'évolution de leur projection au niveau de la rétine varie dynamiquement avec le déplacement des yeux.

³ Une première observation de nos données laisse entendre la possibilité d'une incidence sur le système oculomoteur, du défilement permanent d'une bande de luminosité. On peut en effet observer une dérive de l'œil lors des fixations, qui suit le mouvement de la bande lumineuse (de haut en bas, ou de bas en haut si l'on inverse l'écran).

3. *La fréquence de rafraîchissement de l'image affichée:*

Elle définit, en interaction avec la rémanence du phosphore, l'intensité du **scintillement**. La perception de celui-ci peut se faire, en vision périphérique, et selon la sensibilité des sujets, jusqu'à une fréquence maximale de l'ordre de 90 à 100 Hz. (30).

Le **seuil de fusion** (seuil de non perceptibilité) est cependant très inférieur, pour la population moyenne **aux alentours de 40 à 50 Hz**. Malgré cela, **au-delà de cette limite**, certains des effets physiologiques induits par le scintillement continuent à être observés au niveau du système nerveux central, **indiquant qu'un éclairage subliminalement scintillant n'est pas l'objet de traitements équivalents à ceux d'une lumière continue** ⁴. Des informations sur ces variations à haute fréquence atteignent donc le cortex sans forcément conduire à une perception de scintillement.

C'est ce phasage des neurones sur la fréquence des "flashes" qui est responsable de l'apparition des crises d'épilepsie chez les sujets photosensibles, et peut-être des migraines chez les autres ⁵ (2, 12, 30).

⁴ Les neurones de certaines régions déchargent en phase avec la pulsation lumineuse jusqu'à un seuil absolu de 160 Hz., au-delà duquel toute synchronisation est impossible (montré chez le chat dans le tractus optique et le noyau géniculé latéral; les caractéristiques de la pulsation seraient transmises à l'ensemble des structures impliquées dans la vision: prétectum, colliculus supérieur, noyau intralaminaire médial, noyaux géniculés dorso-latéraux, et à leurs cibles respectives).

⁵ L'activité intense et prolongée d'une population importante de cellules nécessite un apport conséquent en énergie et oxygène, assuré par l'irrigation sanguine; les migraines sont en général causées par des variations de constriction ou de dilatation des vaisseaux sanguins au niveau cérébral.

B) LES EFFETS SUPPOSÉS DU SCINTILLEMENT SUBLIMINAL SUR LES TRAITEMENTS SENSORI-MOTEURS ET COGNITIFS DE L'INFORMATION VISUELLE:

Il a été montré que **l'instabilité lumineuse causée par le scintillement perturbe les traitements cognitifs** (ralentissement de 20 à 30 % du temps de lecture d'un texte sur écran cathodique, par rapport à la lecture du même texte sur un support papier), **ainsi que les traitements sensori-moteurs de bas niveau** (modification de la position de première fixation de l'œil dans le mot et augmentation du nombre de refixations, en fonction de la fréquence de rafraîchissement utilisée)⁶. (3)

Il est cependant difficile de savoir à quel niveau des traitements la lecture sur écran est perturbée: est-ce lié à un mauvais positionnement de l'œil dans le mot, conduisant à une altération de la prise d'informations, ou plus tard, par interférence du phasage des neurones sur la fréquence de l'écran avec les processus d'élaboration cognitive, ces derniers nécessitant peut-être une organisation différente de l'activité des réseaux (par exemple) ?

⁶ L'importance de ces résultats est de remettre en cause la fiabilité des études réalisées à l'aide d'écrans cathodiques: le scintillement subliminal que ces derniers produisent représente un biais expérimental qui n'est jamais considéré ni neutralisé, et probablement inducteur d'effets (exemple: l'amplitude de la position de première fixation varie avec la fréquence de rafraîchissement de l'écran).

1. *Scintillement et distorsion de l'espace perceptif:*

Le scintillement crée une dégradation dans la qualité informationnelle de l'image. Cette dernière peut paraître stable tant que l'œil ne se **déplace pas** (par les effets combinés des rémanences du phosphore de l'écran et des phénomènes photochimiques de la rétine), **mais au cours de la saccade, une telle continuité disparaît.**

L'image de la cible ne s'inscrit alors plus sur la rétine comme une tache continue étirée par le mouvement de l'œil, mais sous forme de zones successives et plus ou moins distinctes dont la taille dépendra de la vitesse de déplacement du globe oculaire, de la fréquence de rafraîchissement de l'écran, de l'index de rémanence du phosphore, etc.

C'est donc pendant la saccade que le scintillement a toutes les chances de se révéler perturbateur, puisqu'il interfère avec l'exactitude de l'information visuelle en en modifiant l'échantillonnage spatial sur la rétine ⁷.

A cette étape des traitements oculomoteurs pendant le mouvement, **le scintillement induit une rupture des mécanismes de constance spatiale**, nécessaires au maintien de la vitesse et de la direction de déplacement, **en créant une distorsion de l'espace perceptif (20).**

⁷ Lorsque la cible s'éteint, le système oculomoteur se trouve confronté à une situation insolite : déplacer l'œil vers un objet visuel qui n'est plus présent. Lorsqu'elle s'illumine à nouveau avec le rafraîchissement suivant, il n'est pas dit que le système sensori-moteur visuel soit suffisamment élaboré pour reconstruire la permanence d'un tel objet, comme sait le faire le cerveau dans la perception d'images altérées.

2. Les premières observations expérimentales: effets sur la taille des saccades

Il semblerait que la taille des saccades soit diminuée en conditions de scintillement, par comparaison avec une illumination stable:

- ▷ Kennedy et Murray (16, 17, 18) rapportent une diminution régulière de la taille des saccades pour des fréquences de 50, 75 et 100Hz (respectivement 5.29, 5.24, 5.19 caractères), alors qu'à 125Hz, la tendance est à l'augmentation (5.24 caractères).⁸
- ▷ Wilkins (selon Kennedy et Murray 1991) trouve également que les saccades sont plus longues à 50Hz qu'à 100.

On peut cependant citer d'autres études qui ne retrouvent pas ces observations:

- ▷ Krummenacher et Heller (1995, selon 3) n'obtiennent aucun effet de la fréquence de rafraîchissement sur la taille des saccades.
- ▷ Baccino et Pynte (2), et Baccino (3) rapportent l'effet inverse: la taille des saccades croît avec la fréquence jusqu'à un plafond de 125 Hz⁹. Ces auteurs ont cependant conduit leur étude à l'aide d'un écran à phosphore P₂₂, alors que Kennedy et Murray travaillaient avec un écran à phosphore P₄, sans rémanence. La forme physique des variations lumineuses produites par ces deux types d'écrans (onde carrée ou variation en relaxation) explique peut-être la différence. De plus, Baccino et Pynte utilisaient un affichage en polarité positive dans leur expérience, Kennedy et Murray une polarité négative. Autant dire que ces deux expériences étudiaient 2 stimuli différents.

⁸ Les auteurs remarquent qu'en parallèle à ce phénomène, la probabilité de refixation intramot vers la droite augmente entre 50 et 100 Hz, alors qu'elle est diminuée pour 125 Hz.

⁹ Une fréquence de 140 Hz n'améliore plus les performances. Selon Macknik, Fisher et Bridgeman (20), qui ne retrouvent aucune modification de la taille des saccades entre 130 et 260 Hz, il existerait un seuil absolu au-delà duquel le scintillement subliminal n'influence plus les traitements sensori-moteurs.

3. *Quel facteur pertinent: fréquence, ou nombre de rafraîchissements pendant la saccade ?*

L'ensemble de ces informations suggère que le stimulus perturbateur le plus pertinent ne serait peut-être pas la fréquence de balayage de l'écran, mais plutôt le nombre de rafraîchissements reçus par l'œil pendant son déplacement.

Baccino et Pynte (2), et Baccino (3) rapportent en effet que pour des saccades de 1° d'excentricité évoquées par l'apparition d'une cible de 7 caractères, celles qui reçoivent 2 rafraîchissements tombent en moyenne sur le 3^e caractère, alors que celles qui en reçoivent 3 tombent plutôt sur le quatrième.

De plus, toujours selon les mêmes auteurs, le nombre de rafraîchissements reçus pendant la saccade aurait pour vertu d'augmenter la vitesse moyenne de l'œil (testé en polarité positive). De 10 pixels / ms pour des saccades évoquées par des cibles de 7° d'excentricité ayant eus 2 rafraîchissements, on passe à 13.8 pixels / ms pour des saccades de même taille recevant 5 rafraîchissements par modification de la fréquence. Cet effet serait indépendant de la durée de la saccade.

La polarité intervient également dans ces résultats, puisqu'elle définit 2 types de stimulus subliminaux différents. Kennedy et Murray (1996) rapportent que la fréquence de rafraîchissement ne modifie les performances oculomotrices qu'en polarité négative. Il y aurait peu d'effets en polarité positive, sauf lorsque la distance à parcourir dans un champ scintillant est importante.

C) CONCLUSIONS:

- ▷ Il semble que c'est au cours de la saccade que le scintillement subliminal perturberait la motricité de l'œil, ***en créant une distorsion de l'espace perceptif sous l'effet du déplacement du champ visuel.***

- ▷ Un **effet conjugué** de la vitesse de traitement de l'information par les systèmes neuraux (sensoriels, oculomoteurs, etc.), de la vitesse de déplacement de l'œil et de la fréquence de rafraîchissement de l'écran, pourrait être responsable de la variation observée dans les effets produits sur les paramètres du contrôle moteur: jusqu'à un seuil de fréquence déterminé, les traitements sensori-moteurs seraient perturbés, et au-delà de cette limite de moins en moins influencés.

- ▷ **La polarité d'affichage** de l'image, localisant le scintillement dans les caractères ou dans le fond, définirait 2 catégories bien distinctes de perturbation physique. Il semblerait que **la localisation du scintillement dans les caractères ou dans les cibles visées se révèle être plus perturbatrice qu'un champ scintillant à traverser pour atteindre une cible stable.**

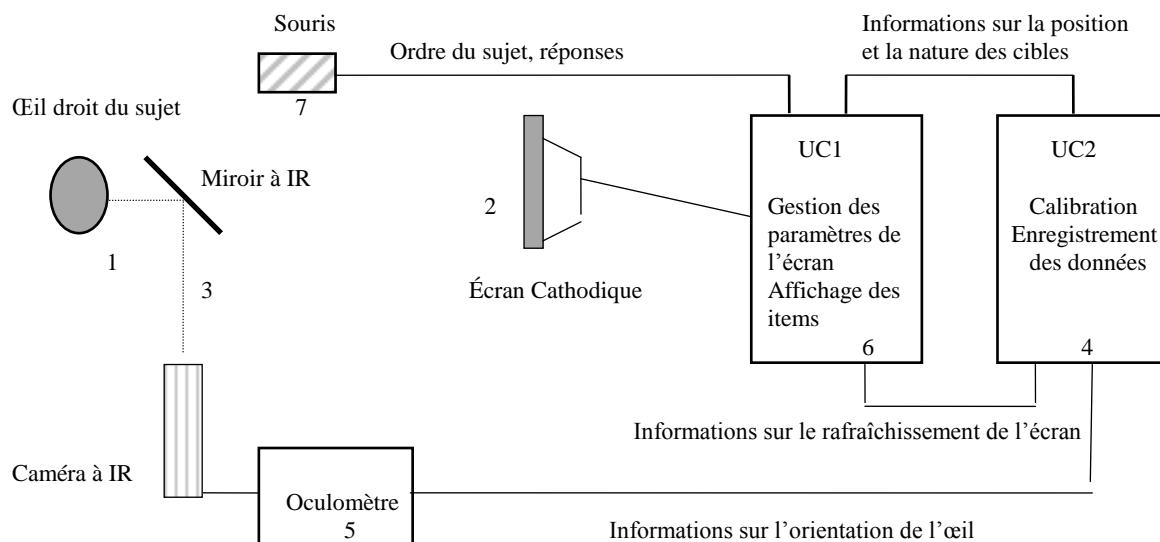
Chapitre 3

MÉTHODOLOGIE

Chapitre 3

MÉTHODOLOGIE**A) ASPECT PRATIQUE DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL:**

Nous avons enregistré les **mouvements saccadiques** des yeux d'étudiants de l'Université de Nice-Sophia Antipolis, sans problèmes de vue, à l'aide d'un **oculomètre à infrarouge** (système Bouis, précision: 5' d'arc, 1 échantillonnage en X et Y par ms).

1. Dispositif matériel:

Le sujet d'expérience (1) est immobilisé sur la **partie contentive de l'oculomètre**, face à un écran cathodique (2) ¹⁰, et le **faisceau infrarouge (IR, 3) disposé sur l'œil droit**. Un réglage fin à l'aide de **l'unité centrale 2 (4)**, dit calibration physique, est ensuite effectué.

La calibration consiste à **s'assurer de la disposition correcte du faisceau IR sur l'œil**, d'une part, et d'autre part, à **établir une relation mathématique entre l'orientation du regard et la position d'une cible affichée à l'écran** (mise en correspondance de 2 référentiels: celui de l'oculomètre et celui de l'écran).

Ce préalable nécessaire **permet de traduire les données brutes** (inexploitables) recueillies aux sorties de l'oculomètre (5) par l'unité centrale 2 (4) (orientation de l'œil), **en position du regard dans l'image affichée** (données recalibrées).

L'ensemble des traitements statistiques est effectué sur ces positions recalibrées.

L'affichage des cibles visuelles dure 1 seconde. **L'enregistrement du mouvement des yeux s'effectue parallèlement à la présentation des items expérimentaux** (pas d'enregistrement pour les items distracteurs - cf. section suivante, concernant les caractéristiques des 2 catégories d'items). Il est réalisé **par l'unité centrale 2** à raison d'un échantillonnage en X et Y chaque milliseconde. Au sein de ces données **est insérée la localisation temporelle du début de chaque nouveau balayage du faisceau d'électrons** (position en haut et à gauche de l'écran).

L'unité centrale 1 (6) est assignée à la seule gestion des paramètres de l'écran et du programme de présentation des cibles visuelles. Elle est connectée en parallèle avec l'unité centrale 2, à laquelle elle transmet différents messages (ordre d'enregistrer, signal du rafraîchissement de l'écran, etc.).

¹⁰

Résolution de l'image: 640 * 350

Taille de l'écran: 17 pouces

Phosphore: P22

Luminosité dans la condition polarité positive: 53,158 cd/m² (proche de 0 en polarité négative)

Distance de l'oeil du sujet: 60 cm

Fréquence de rafraîchissement variable, gérée et vérifiée à l'aide d'un programme informatique.

2. Matériel évocateur:

Les saccades sont évoquées par des **cibles visuelles pseudo-linguistiques**¹¹, qui apparaissent à l'écran sur ordre du sujet (gestion du déroulement de la passation par l'intermédiaire de la **souris** (7)). Ces cibles sont constituées d'une série de **7 lettres majuscules**:

- ▷ 6 X
- ▷ 1 M ou 1 O¹².

Leur rôle est de **mimer l'aspect physique d'un mot de taille moyenne** (enchaînement de plusieurs caractères), tout en **évitant de faire intervenir les composantes psycholinguistiques** de celui-ci, supposées influencer le contrôle oculomoteur.

La tâche des sujets face à un tel matériel consiste à identifier la lettre qui est insérée dans la chaîne de X (ce qui implique un déplacement des globes oculaires vers la cible), puis à donner sa réponse. On présente à chaque personne **120 items**, répartis en 2 catégories:

- ▷ **items expérimentaux**: la lettre O ou M est en position centrale (N=80)¹³
- ▷ **items distracteurs**: la lettre est en position autre (N=40).

Les items sont présentés aléatoirement pour la latéralité (droite: 50%, gauche: 50%), pour le caractère (O: 50%, M: 50%), et pour la catégorie d'appartenance (expérimentaux: 67%, distracteurs: 33%).

¹¹ L'angle visuel d'excentricité entre le centre de l'écran (référentiel, en tant que point de fixation initial du regard) et le milieu de l'item (lettre à identifier, pour les items expérimentaux) est de 2°.

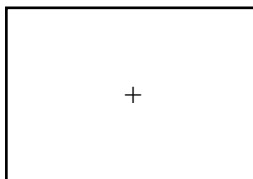
¹² Le choix des lettres O et M est relatif à la présence / absence de traits communs avec les X.

¹³ Le choix d'insertion de la lettre en position centrale pour les items expérimentaux prend en considération les différentes études en psychologie de la lecture, sur la position de première fixation du regard dans un mot, proche de son milieu physique. Nous savons de plus que l'œil tendra à viser la lettre insérée, puisque la tâche des sujets est de l'identifier; ainsi, toute déviation significative observée de cette PPF par rapport à la position centrale du mot prendra un sens particulier en fonction des variables manipulées.

3. *Déroulement d'une passation:*

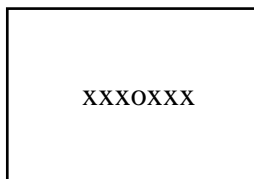
Le sujet voit apparaître 3 menus successivement.

▷ **Au premier:**



Il fixe une croix située au centre de l'écran. Lorsqu'il se sent prêt, il déclenche le menu suivant à l'aide de la souris.

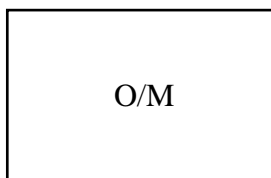
▷ **Au second:**



Sa tâche est d'identifier la lettre insérée dans les X.

Ici, la durée d'affichage de l'item est fixée par l'expérimentateur à 1 seconde, après quoi l'écran suivant apparaît automatiquement.

▷ **Au troisième:**



Il doit fournir sa réponse par l'intermédiaire de la souris. Ceci déclenche la réapparition du premier menu.

B) HYPOTHÈSES, VARIABLES MANIPULÉES ET PLAN D'EXPÉRIENCE:

1. Hypothèses:

- 1) **La fréquence de rafraîchissement** de l'écran aurait une incidence sur le contrôle oculomoteur lors des mouvements saccadiques des yeux, par l'instabilité subliminale du champ visuel qu'elle induit. Cette perturbation se traduirait par une modification observable des paramètres de la saccade (taille, durée, latence d'évocation, vitesse).
- 2) Le stimulus le plus pertinent ne serait pas la fréquence de rafraîchissement de l'écran, mais **le nombre de fois où la cible est rafraîchie pendant le déplacement de l'œil**.
- 3) La saccade oculaire ne serait pas un mouvement totalement balistique; elle **pourrait être modulée "en vol"** dans une certaine limite. **Ainsi, il y aurait peut-être une visée de la cible durant la saccade, par un processus de rétrocontrôle dynamique.**
- 4) **La polarité d'affichage** positive affecterait le système oculomoteur de manière différente de la polarité négative.

2. Variables manipulées:

a) Variables indépendantes: caractéristiques de l'image générée par l'écran.

1) polarité d'affichage:

- ▷ positive
- ▷ négative

2) Fréquence de rafraîchissement de l'écran¹⁴:

- ▷ 62 Hz
- ▷ 82 Hz
- ▷ 125 Hz

3) Latéralité de présentation:

- ▷ gauche
- ▷ droite

4) Caractère:

- ▷ O
- ▷ M

5) Nombre de rafraîchissements de l'écran qui se produisent au cours de la saccade (facteur construit):

- ▷ 1
- ▷ 2
- ▷ 3

¹⁴ Nous avons choisi l'écart temporel séparant 2 rafraîchissements d'écran de façon à ce que, d'une condition de fréquence à l'autre, existe une différence constante. Ainsi, à 62 Hz, le faisceau d'électrons balaye un même point de l'écran toutes les 16 ms, à 82 Hz, toutes les 12 ms, et à 125 Hz, toutes les 8 ms.

b) Variables dépendantes: paramètres de la saccade.

- 1) Position de première fixation dans la cible (correspondant à la taille de la saccade, exprimée en pixels).
- 2) Durée (en ms).
- 3) Latence d'évocation (en ms).
- 4) Vitesse instantanée de l'œil (en pixels/ms).
- 5) Localisation temporelle intrasaccadique du début du rafraîchissement d'écran (en % de la durée totale de la saccade).

c) Variable neutralisée:

Sexe (50 - 50), bien que supposé ne jouer aucun rôle.

3. *Plan de base ayant structuré l'expérience:*

$$S_{12} < P_2 * F_3 > * L_2 * C_2 \quad ^{15}$$

Chaque sujet passe dans une condition unique de polarité d'affichage et de fréquence de rafraîchissement.

D'autres plans, légèrement modifiés, ont été utilisés pour organiser les données lors des analyses, en fonction de la construction des fichiers. Ils seront détaillés dans la présentation de chacune d'elles (section D) Analyses effectuées).

¹⁵

S = sujet
P = polarité
F = fréquence
L = latéralité
C = caractère

C) TRAITEMENT DES DONNÉES:

Un complexe de logiciels extrait, des données brutes recalibrées dans le référentiel de l'écran, les facteurs qui nous intéressent (cf. variables dépendantes présentées à la section B)2. de ce chapitre).

Un **double filtrage** des saccades est réalisé:

- ▷ Visuellement (élimination des enregistrements artefactés).
- ▷ Mathématiquement, à l'aide du logiciel Excel 5 ¹⁶.

Il permet d'**éliminer des fichiers les principales anomalies d'enregistrement**, liées la plupart du temps à l'activité des sujets (mouvements de tête, clignements d'yeux, absence de saccade oculaire, "saccades express" et "antisaccades", etc.).

Les **analyses statistiques** sont réalisées sur ces fichiers de données triées et prétraitées, à l'aide du logiciel **CSS Statistica** (l'ensemble des traitements est présenté en annexes).

¹⁶ Valeurs des filtres choisies:

- Taille comprise entre 18 et 74 pixels (zone correspondant à la présence de la cible à l'écran).
- Latence d'évocation supérieure à 100 ms, et inférieure à 300.
- Durée limitée à 30 ms.

D) ANALYSES EFFECTUÉES:

1. ANOVA:

- a) Tester les effets de la fréquence de rafraîchissement et de la polarité d'affichage sur les paramètres du contrôle oculomoteur:**

Analyse réalisée à partir de l'ensemble des données récoltées dans le protocole de passation, selon le plan d'expérience présenté à la section B)3.

- b) Tester les effets du nombre de rafraîchissements d'écran survenus durant le mouvement des yeux, sur les paramètres du contrôle oculomoteur:**

Analyse réalisée en intégrant un facteur construit calculé à posteriori (nombre de rafraîchissements de l'écran reçus par l'œil durant la saccade). Étant donné qu'à 62 Hz, aucune saccade ne reçoit 3 rafraîchissements (de même à 125 Hz pour 1 rafraîchissement) il a été nécessaire de diviser les données en 2 fichiers, l'un renfermant les saccades produites à 62 et 82 Hz, et recevant 1 ou 2 rafraîchissements, l'autre pour 82 et 125 Hz, avec 2 et 3 rafraîchissements.

Plan utilisé: $S_{12} < P_2 * F_2 > * L_2 * C_2 * Ra_2$ ¹⁷.

- c) Tester les effets de la localisation intrasaccadique du rafraîchissement de l'écran (par tiers de la totalité du mouvement, en pourcentage de la durée) sur les paramètres du contrôle oculomoteur:**

Analyse réalisée pour des saccades produites à 62 Hz, et n'ayant reçu qu'un seul rafraîchissement.

Plan utilisé: $S_{12} < P_2 > * L_2 * C_2 * T_3$ ¹⁸.

¹⁷ Ra pour nombre de rafraîchissements d'écrans survenus durant l'effection de la saccade.

¹⁸ T pour tiers, calculé en pourcentage de la durée totale de chaque saccade.

2. Analyse des corrélations:

Réalisée sur la totalité des données de l'expérience pour objectiver la force de relation existant entre les différents paramètres du contrôle oculomoteur durant la saccade.

3. ANCOVA:

Utilisée pour faire apparaître les effets des différents facteurs étudiés sur la taille (variable) indépendamment de la durée (covariable), puisque taille et durée sont en étroite corrélation (se reporter aux résultats de l'analyse précédente, présentés en annexes).

Plan utilisé: $S_{12} < P_2 * F_2 > * L_2 * C_2 * Ra_2$ (analyse effectuée sur les 2 fichiers intégrant le nombre de rafraîchissements reçus par l'œil durant la saccade. Voir ANOVA, b, p 43).

4. Analyse des χ^2 :

Réalisée sur les distributions observées (par comparaison aux distributions théoriques calculées) de saccades n'ayant reçu qu'un seul rafraîchissement ¹⁹, en fonction de la localisation de celui-ci en % de la durée totale du mouvement. But: mettre en évidence une synchronisation de l'activité du système oculomoteur avec le scintillement de l'écran.

¹⁹ A 62 ou 82 Hz, en polarité positive ou négative.

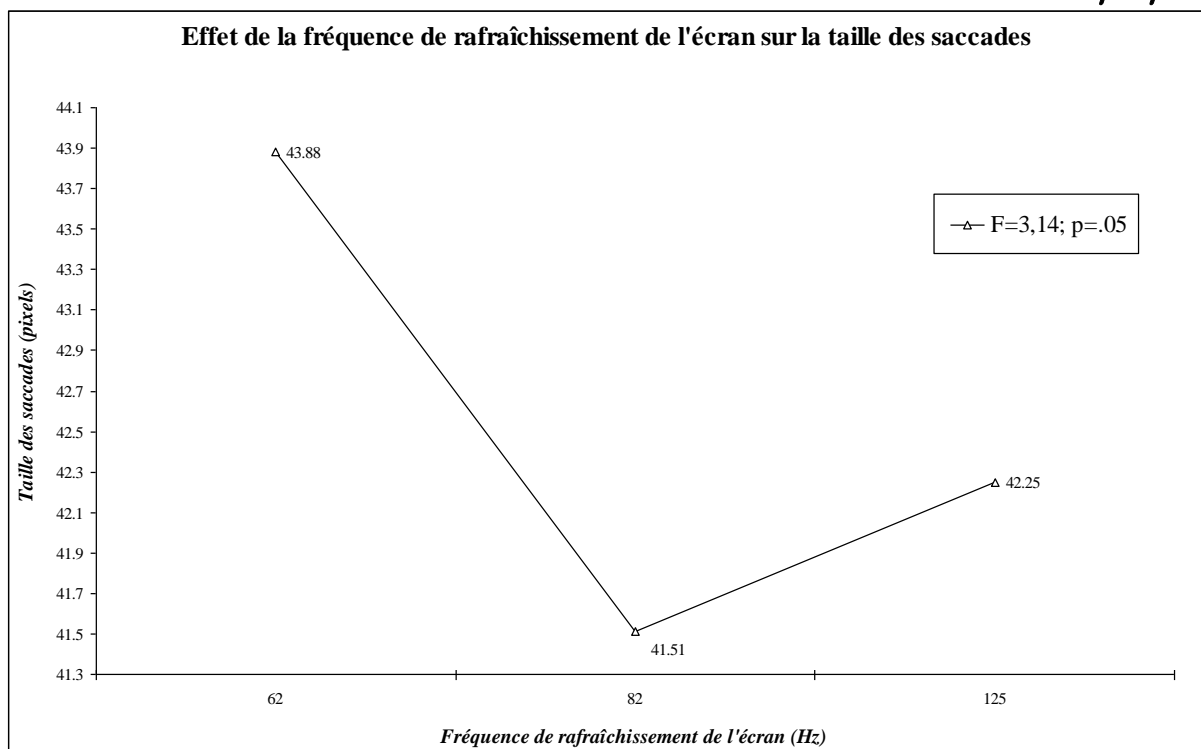
Chapitre 4

RÉSULTATS – DISCUSSION

Chapitre 4

RÉSULTATS - DISCUSSION**A) EFFETS DE LA FRÉQUENCE DE BALAYAGE ET DU NOMBRE DE RAFRAÎCHISSEMENTS INTRASACCADIQUES:**

Les résultats que nous obtenons (ANOVA) viennent confirmer ceux des études antérieures (2, 3, 16, 17, 18), quand à la modification de la taille des saccades en fonction de la fréquence de rafraîchissement de l'écran:

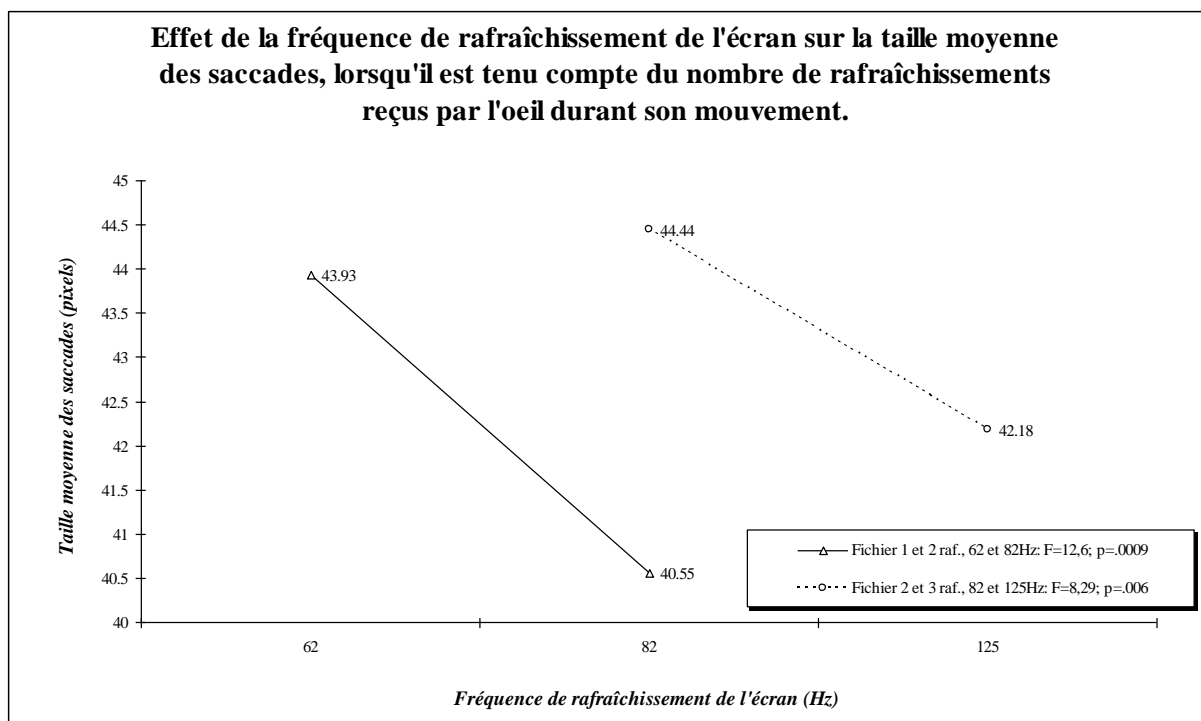
Graphique 1

Il est curieux de constater que cet effet n'est pas linéaire. Comment expliquer qu'entre 62 et 82 Hz la taille diminue, alors qu'elle augmente entre 82 et 125Hz ? Kennedy et Murray ont trouvé à plusieurs reprises un tel phénomène (voir chapitre 2), qui reste difficile à interpréter.

Il pourrait être produit par un effet d'interaction plus ou moins complexe, mais il semble possible de donner une explication simple en faisant intervenir un facteur construit a posteriori, qui est le nombre de rafraîchissements d'écran se produisant lors du mouvement de l'œil.

Le graphique suivant montre le même effet que précédemment (fréquence de rafraîchissement, sur la taille) à partir des ANOVA réalisées sur les 2 fichiers de données où il était aussi tenu compte du nombre de rafraîchissements qui ont lieu pendant la saccade:

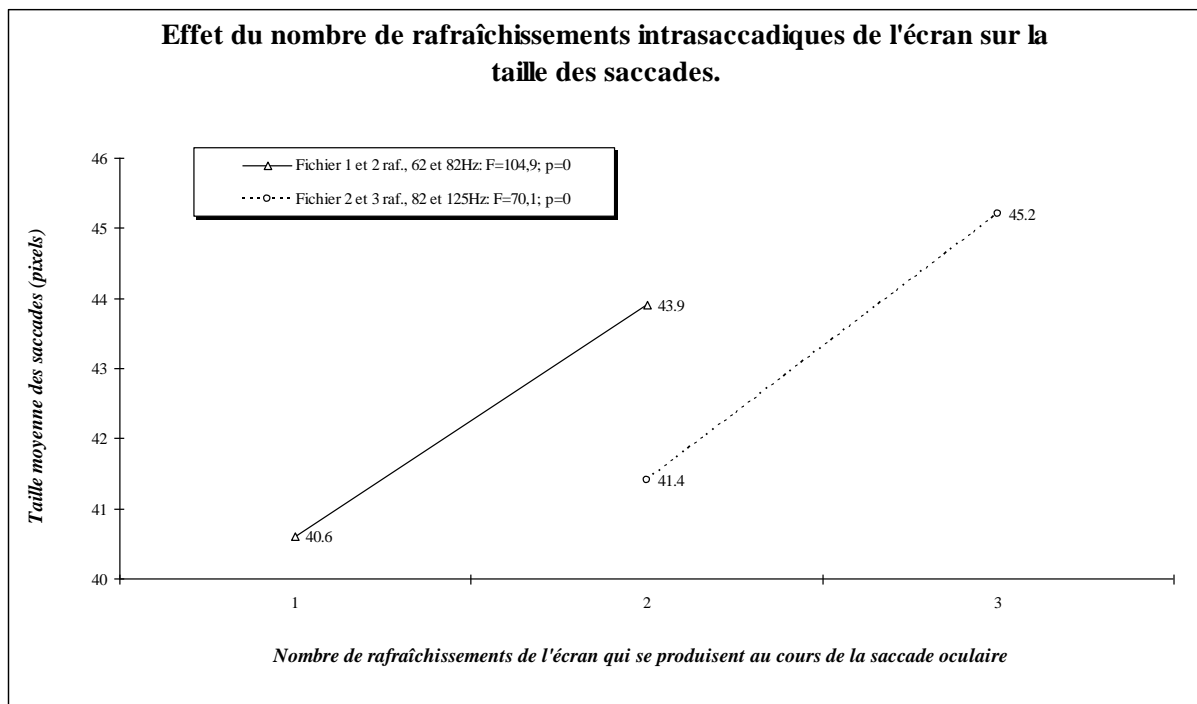
Graphique 2



Il apparaît ici que **la taille tend toujours à diminuer lorsque la fréquence augmente**, semblant indiquer que l'effet de cette dernière serait de réduire l'amplitude des saccades (cette diminution due à la fréquence de rafraîchissement se retrouve aussi sur la durée (fichier 1: $F=5,83$; $p=.02$ - fichier 2: $F=28,61$; $p=.000003$) et sur la vitesse moyenne de l'œil (fichier 1 uniquement: $F=5,38$; $p=.025$). Consulter les résultats des analyses en annexes pour plus de détails).

On constate aussi un autre phénomène, par comparaison de ces 2 courbes, évident à 82 Hz: **la taille des saccades augmente avec le nombre de rafraîchissements reçus par l'œil durant son mouvement** (cet effet est très fort, et il se retrouve aussi sur la durée et la vitesse moyenne de l'œil. Se reporter aux annexes). Voici une illustration de ces résultats (ANOVA) pour ce qui concerne le paramètre taille:

Graphique 3



Toutefois, on ne peut se permettre d'affirmer qu'il y ait bien une causalité directe entre le nombre de rafraîchissements et la taille des saccades. Le fait que la significativité des résultats soit aussi élevée, laisse effectivement penser que ceux-ci ont pu être induits par quelque phénomène d'autosélection: les saccades les plus grandes sont aussi celles qui ont la plus forte probabilité de recevoir un nombre important de rafraîchissements, partant du fait que taille et durée sont en étroite corrélation ($r_{(2553)} = .086$; $p=0$)²⁰.

Il est bon de rappeler ici les résultats du travail de Baccino et Pynte (2), qui montrait qu'une influence du nombre de rafraîchissements reçus par l'œil lors de son déplacement sur la taille des saccades (voir chapitre 2, p.33), pouvait être à envisager sérieusement.

²⁰ Pour cette raison, le travail d'interprétation présenté ici fait pratiquement abstraction des résultats sur les durées, qui suivent pas à pas ceux sur la taille. De même pour la vitesse, liée à la taille de façon très forte ($r_{(2553)} = .044$; $p < .027$).

Il a donc fallu trancher sur ce problème, à l'aide d'une **ANCOVA** réalisée pour les facteurs spatiaux (taille) et temporaux (durée) de la saccade. **Le nombre de rafraîchissements de l'image reçus par l'œil tandis qu'il se déplace, lié à la fréquence de rafraîchissement de l'écran, dépend aussi de la durée du mouvement.** Nous avons donc fait figurer en variable la taille, et la durée en covariable, afin de **voir si des facteurs parmi ceux étudiés faisaient varier la taille indépendamment de la durée.**

Il apparaît que **l'effet sur la taille du nombre de rafraîchissements de l'écran durant la saccade n'est significatif qu'entre 1** (taille moyenne=40,6 pixels) **et 2** (43,9) **rafraîchissements** ($F=4,96$; $p=.03$), **et n'a aucune incidence entre 2 et 3 rafraîchissements** ($F=0,98$; $p=.33$).

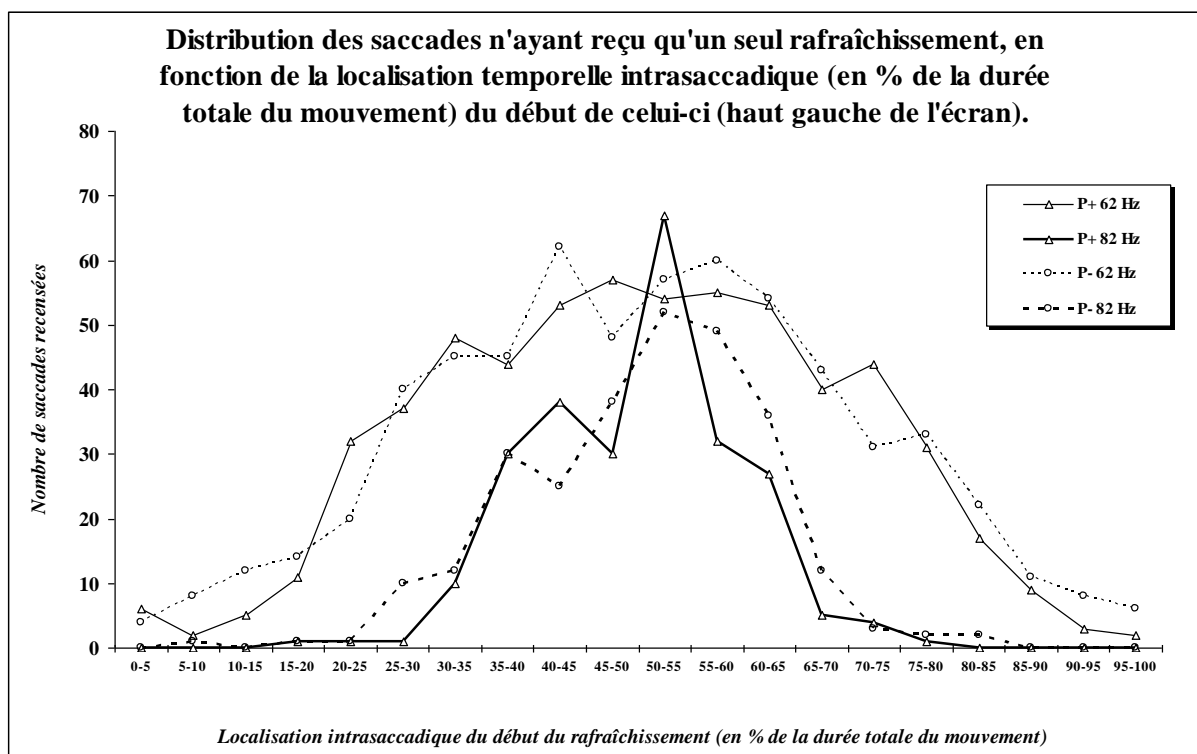
Ou bien l'absence de résultats que l'on observe entre 2 et 3 rafraîchissements est réelle, ce qui signifierait que la perturbation qu'entraînent 2 rafraîchissements équivaut à celle produite par 3 pour le système oculomoteur, alors que 1 rafraîchissement induirait un effet de nature particulière; ou bien elle est due au très faible nombre de données dans la condition "3 rafraîchissements à 82 Hz" (3,37% de saccades sur un effectif de 1751, contre 62,33% ($N=1659$) à 125 Hz), responsable d'un écrasement des écarts par remplacement des valeurs absentes avec des moyennes.

Il fallait donc se demander quelle logique pourrait sous-tendre une différence significative entre 1 et 2 rafraîchissements seulement. Ce qui suit fournit peut-être une explication.

En observant les résultats en détail, on s'est aperçu que le système oculomoteur semblait synchroniser son activité avec la fréquence de rafraîchissement de l'écran.

Le graphique 4 représente la distribution des saccades qui n'ont reçu qu'un seul rafraîchissement (pour les 2 polarités, et à 62 et 82 Hz). Elle tient compte de la localisation intrasaccadique de ce dernier (en pourcentage moyen de la durée totale du mouvement, par tranche de 5%) :

Graphique 4



Il apparaît nettement que cette répartition présente un pic centré sur 45-60%, le milieu temporel de la saccade, qui n'est pas le fruit du hasard.

Une analyse des χ^2 ²¹ permet d'objectiver cette affirmation:

Tableau 1

	χ^2	p
62 Hz, polarité positive	45,8	< .0005
62 Hz, polarité négative	39,1	< .004
82 Hz, polarité positive	215,7	0
82 Hz, polarité négative	160,5	0

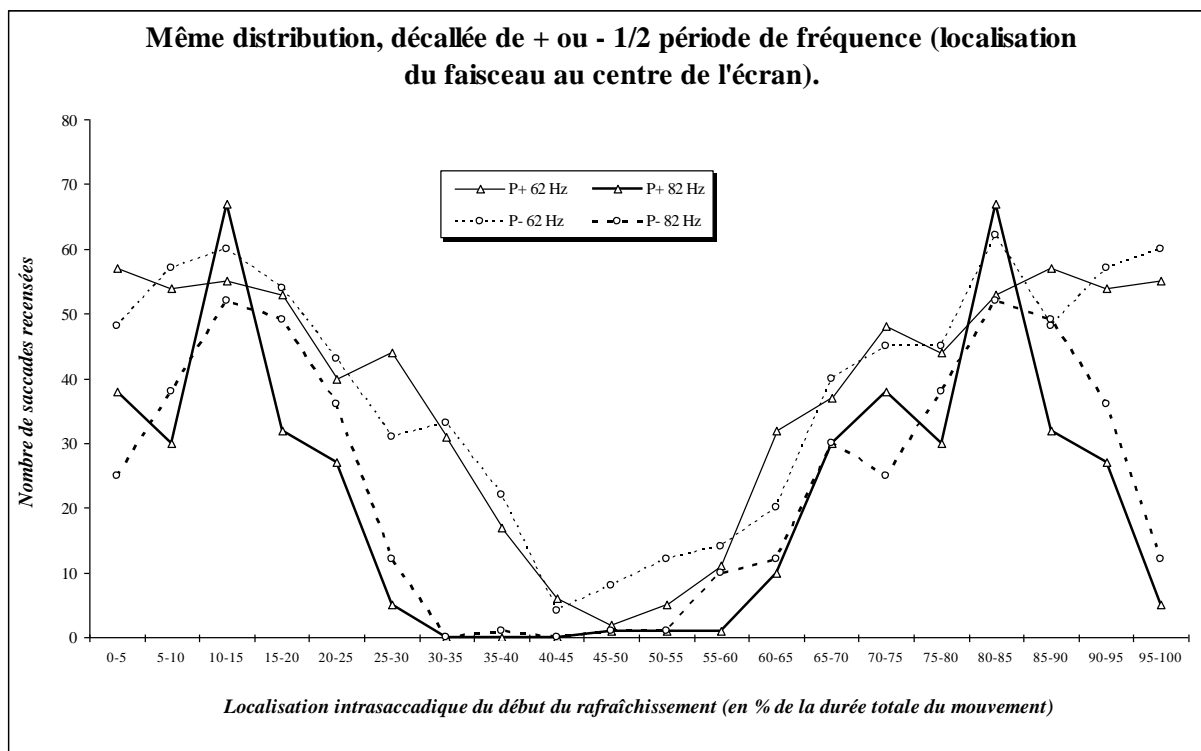
²¹ χ^2 calculés par comparaison d'effectifs observés et d'effectifs théoriques calculés pour chaque catégorie.

Que ces analyses portent sur la localisation du faisceau d'électrons en haut et à gauche de l'écran (signal du début de chaque nouveau rafraîchissement) n'invalide pas les résultats statistiques, qui démontrent un effet de synchronisation. Par contre, dans le cas de la polarité négative, il était impossible que le système oculomoteur se soit synchronisé avec une telle localisation, puisqu'aucun point de cette zone de l'écran n'était illuminée lors du signal. La seule région de l'écran qui l'ait été une demi-période plus tard correspond au milieu vertical où se trouve la cible affichée. Il faut donc établir une correction du graphique 4 en décalant systématiquement la distribution d'une demi-période supplémentaire.

Ce raisonnement semble aussi valable pour la polarité positive, puisque d'une part le sujet ne porte jamais son attention en haut ou en bas de l'écran, mais seulement où des cibles sont susceptibles d'apparaître, et d'autre part, la distribution des saccades en polarité positive suit étroitement celle observée pour la polarité négative.

On observe alors que la synchronisation du mouvement avec la fréquence ne se fait plus de façon à ce que le rafraîchissement de cette nouvelle zone de l'écran tombe au milieu du mouvement, mais plutôt au début, et résiduellement, à la fin:

Graphique 5



Il est intéressant de noter que cette synchronisation ne s'accompagne d'aucune modification significative des latences d'évocation en fonction de la localisation intrasaccadique du rafraîchissement ($F=0,28$; $p=.76$. Analyse réalisée sur les saccades recevant 1 rafraîchissement à 62Hz). L'ensemble des résultats obtenus sur les latences se sont d'ailleurs presque toujours révélés nuls (se reporter au détail des annexes), excepté dans le cas des fichiers de saccades recevant 1 ou 2 rafraîchissements à 62 et 82Hz ($F=6,13$; $p=.017$), où **le départ de l'œil est légèrement retardé pour 1 rafraîchissement (175,4 ms) par rapport à 2 (172,9 ms).**

L'effet de synchronisation qui s'observe serait donc à interpréter comme l'indication du déclenchement du programme moteur sous l'effet d'un signal de départ, lié à l'état (correspondant ici à la luminance) du stimulus visuel, lorsque celui-ci est rafraîchi par le balayage ou juste avant qu'il ne le soit. **Il semblerait donc que le système sensoriel visuel soit capable de percevoir les variations de luminosité du stimulus, et donc le scintillement, même lorsque l'œil est immobile.**

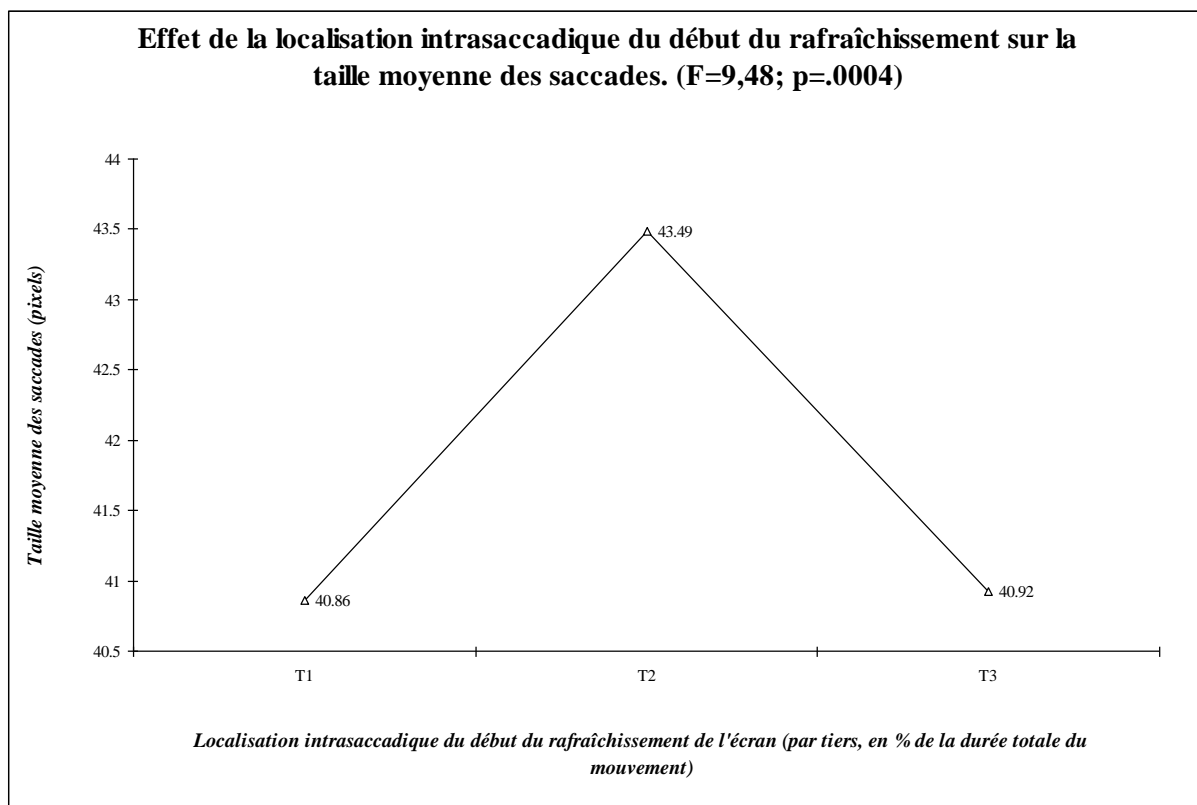
Il fallait ensuite rentrer plus avant dans le détail de ce processus adaptatif, pour mieux en saisir le fonctionnement.

Nous avons réalisé une ANOVA à partir des saccades produites à 62 Hz (avec les 2 polarités d'affichage), et qui ne recevaient qu'un seul rafraîchissement, afin de voir si la localisation de ce dernier à différents moments du mouvement²² modifiait les paramètres de taille, vitesse et durée. **Il s'agissait aussi de mettre en évidence l'existence éventuelle d'un rétrocontrôle dynamique de la saccade oculaire en fonction de l'évolution de la cible. En d'autres termes, d'un contrôle de la visée au cours du mouvement.**

Les résultats de cette analyse montrent que, selon la localisation intrasaccadique du rafraîchissement, il se produit une modulation significative:

1. de la taille:

Graphique 6

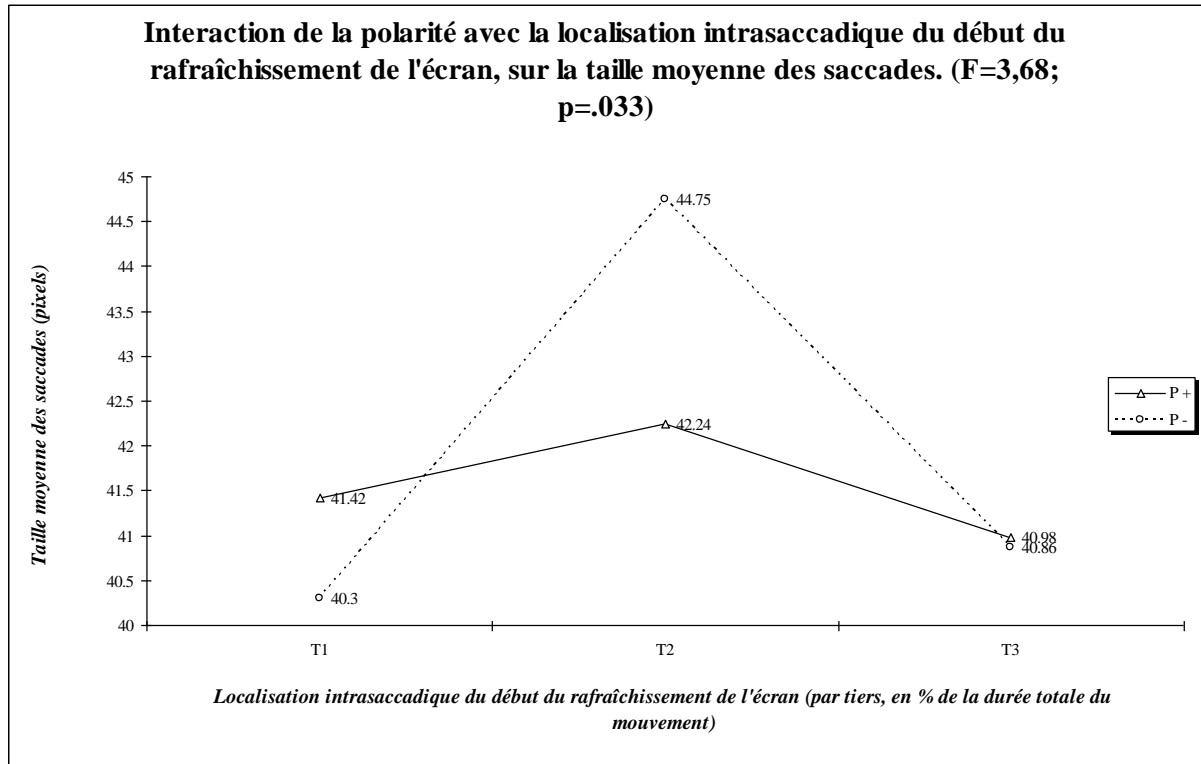


²²

Découpage par tiers, en pourcentage de la durée totale du mouvement.

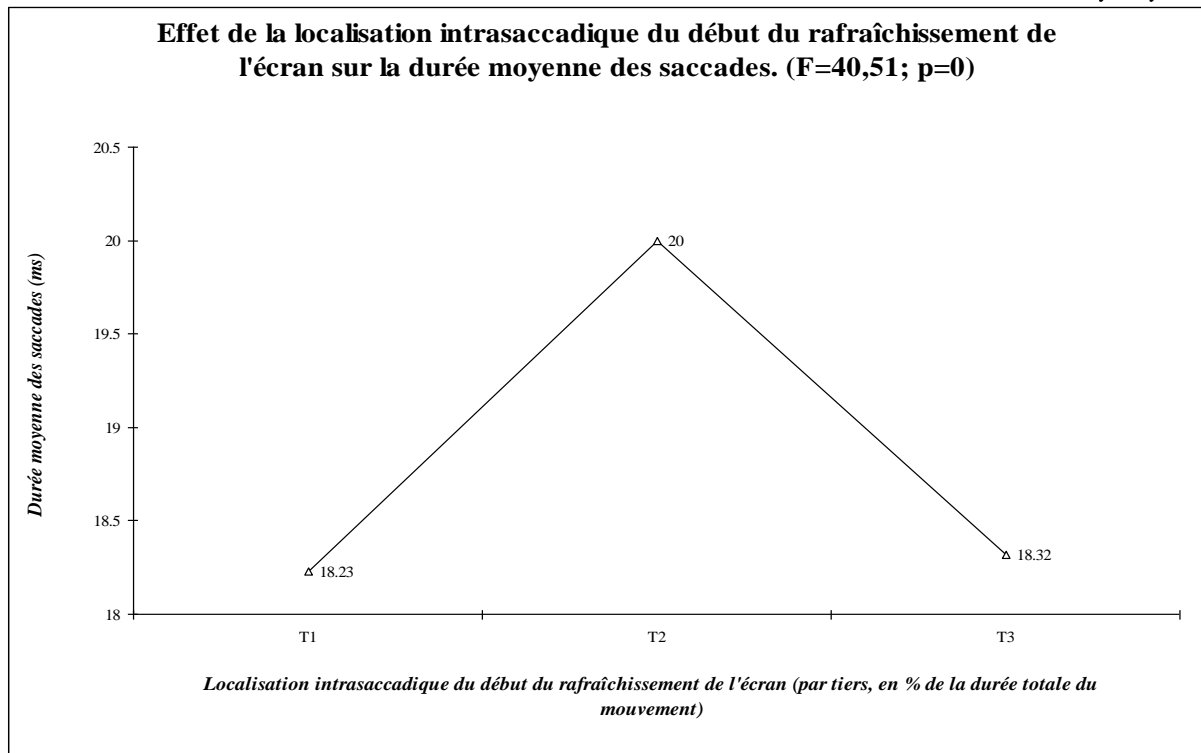
Cette modification est légèrement, mais significativement, différente en fonction de la polarité d'affichage, plus accentuée avec une polarité négative, indiquant que **le scintillement de la cible affecterait plus directement le contrôle oculomoteur que le scintillement du fond**:

Graphique 7



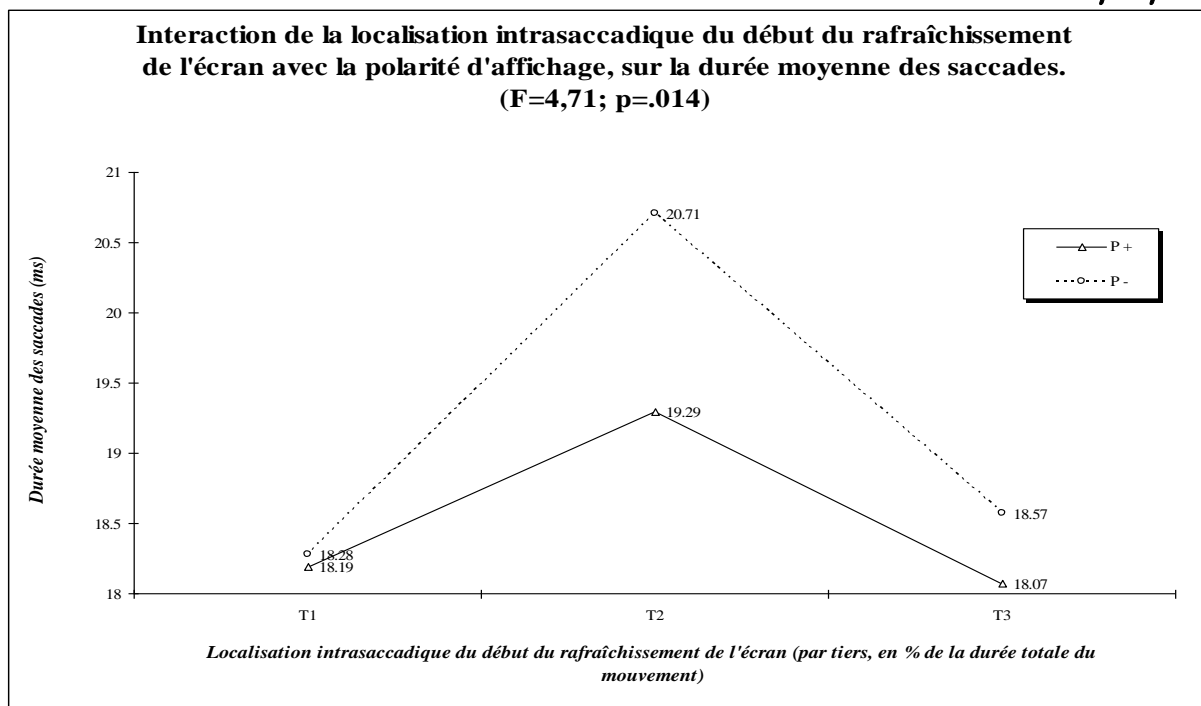
2. de la durée:

Graphique 8



Même remarque que précédemment: il existe une différence dans la force de l'effet selon la polarité d'affichage, **plus importante avec un scintillement de la cible que du fond de l'écran.**

Graphique 9



Il ne ressort aucun effet significatif de la localisation intrasaccadique du début du rafraîchissement sur la vitesse moyenne de l'œil, indiquant que **les modulations des tailles qui sont observées sous l'effet de ce facteur sont dues à des variations du paramètre durée uniquement** ²³.

Avant d'exploiter ces résultats "bruts", il convient toutefois d'effectuer une correction nécessaire, puisque nous sommes dans le même cas de figure qu'avec la distribution des saccades utilisée pour les χ^2 (graphique 4): il s'agit de localisations temporelles figurant le début du rafraîchissement (haut gauche de l'écran), qui n'a pas forcément de réalité physique à l'affichage.

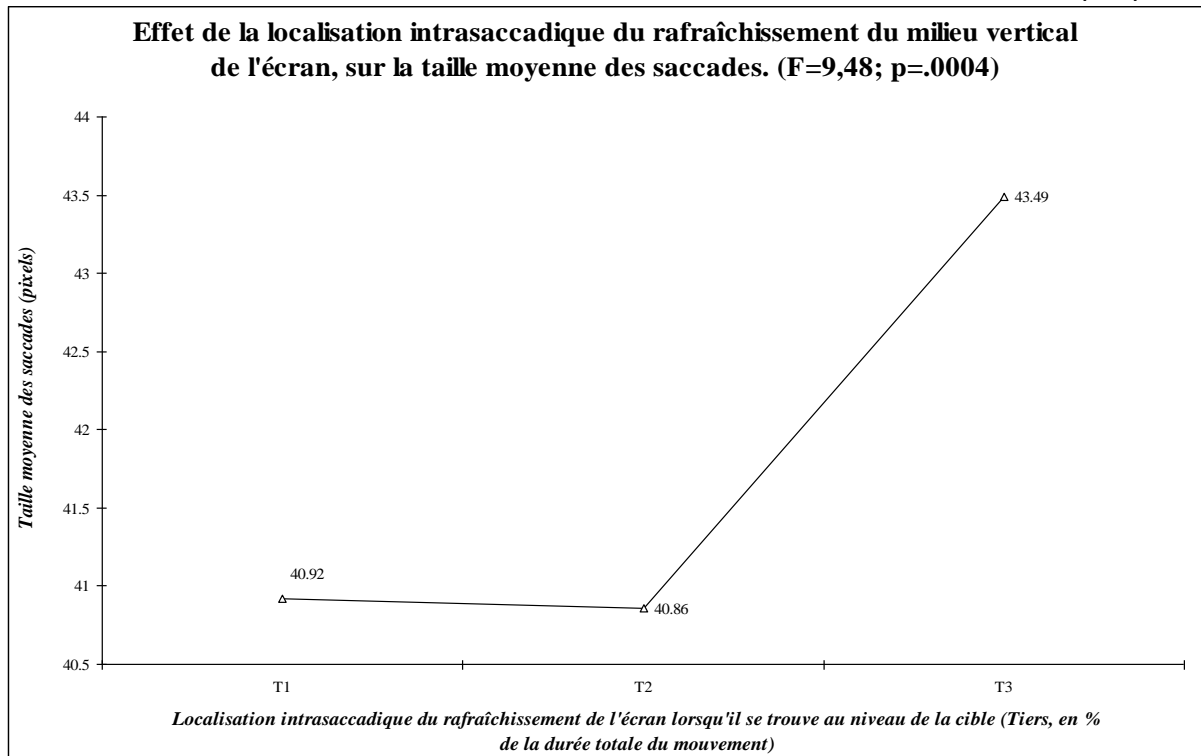
Après retranscription, ce qui paraissait être un effet d'augmentation des valeurs du à une localisation intrasaccadique du début du rafraîchissement moyen sur le second tiers du mouvement, correspondra en fait à une localisation du rafraîchissement moyen du milieu vertical de l'écran lors de la demi-période de fréquence suivante, qui a lieu sur le dernier tiers du mouvement.

²³ Il faut cependant noter qu'un effet sur la vitesse de la localisation intrasaccadique du début du rafraîchissement existerait peut-être, malgré tout, bien que notre expérience n'ait pu le mettre en évidence, car on constate que pour le second tiers, la valeur du p se rapproche du seuil de significativité alors qu'on en est loin pour les deux autres:

Tiers 1	Tiers 2	Tiers 3
F=1.86; p=.17	F=2.73; p=.076	F=1.41; p=.26

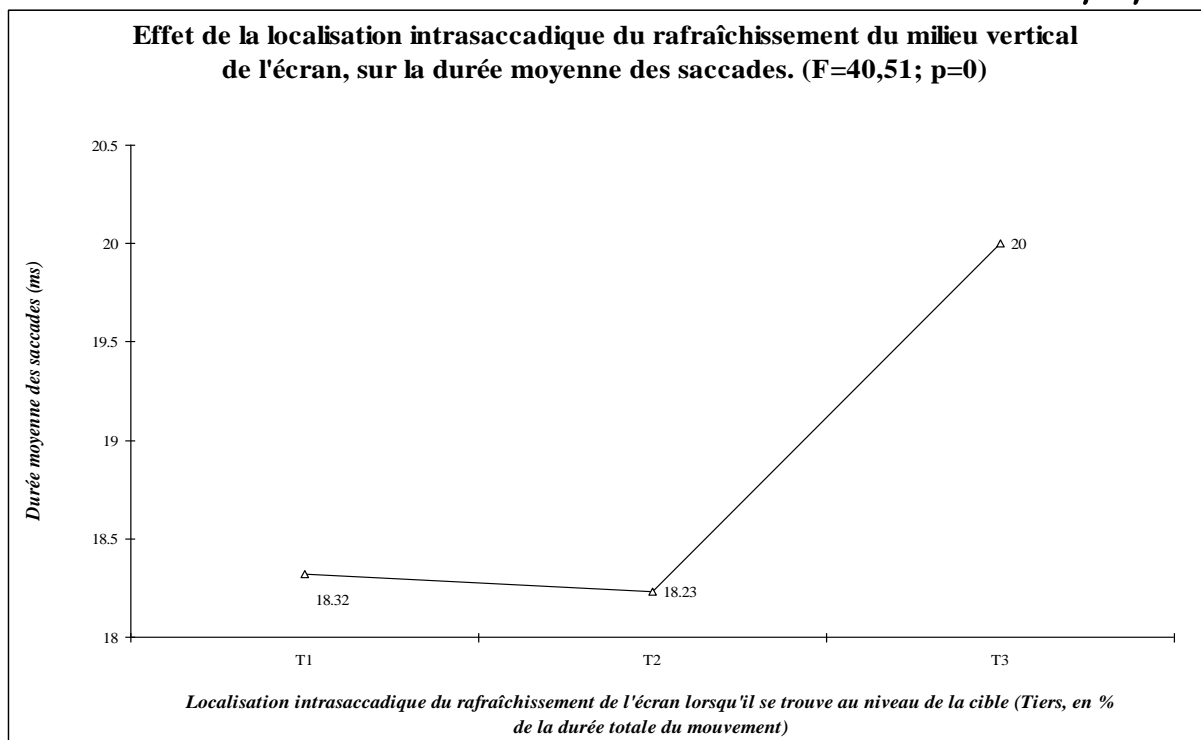
On observe alors qu'une augmentation de la taille moyenne des saccades se produit lorsque le rafraîchissement moyen de la cible a lieu vers la fin du mouvement:

Graphique 10



Le même phénomène s'observe pour la durée:

Graphique 11



Il est possible d'envisager deux hypothèses contraires pour expliquer ce qui s'observe:

- ▷ Lorsque le rafraîchissement de la cible se localise en moyenne sur le dernier tiers, il n'a pas la possibilité d'entraîner une modification de la saccade, car il faut au système oculomoteur un temps de latence minimum pour réagir. Ce qui semble être une augmentation des valeurs serait alors à envisager comme une absence de perturbation ou de modulation du mouvement "en vol". Par contre, lorsque le rafraîchissement de la cible se localise en moyenne au début et au milieu de la saccade, une correction pourrait être effectuée, qui se traduirait par une diminution des valeurs. Une telle hypothèse sous-entend que le contrôle sensori-moteur de l'œil sous-évaluerait systématiquement et identiquement la position de la cible, lorsque le signal se produit sur les 2 premiers tiers de la saccade.
- ▷ Mais le cas de figure inverse doit aussi être envisagé: le rafraîchissement qui se produit en moyenne sur le dernier tiers entraîne une modulation "online" de la durée des saccades, ce qui se traduit par une augmentation de leur taille, par comparaison à une localisation sur les deux premiers tiers, qui entraînerait une sous-évaluation de la distance à parcourir jusqu'à la cible. Dans ce cas, la modulation du mouvement se ferait donc par ajustement final. Cependant, comme cette hypothèse entraîne la supposition de temps de réaction extrêmement brefs, elle pose un problème de validité. On peut en effet se demander s'ils sont compatibles avec les données fournies par la neurophysiologie quand à la vitesse de conduction de l'influx nerveux, relativement à l'organisation neuromusculaire du système oculomoteur (distances minima qui doivent être parcourues par tout signal visuo-moteur). Il faut donc noter que les localisations intrasaccadiques dont il s'agit dans ce cas sont des valeurs moyennes par tiers, qui présentent une certaine imprécision. Si l'on regardait dans le détail (comme par exemple pour les distributions présentées avec les analyses des χ^2 , par intervalles de 5% de durée - Graphiques 4 et 5), il apparaîtrait que pour certaines saccades, lorsqu'un rafraîchissement de la cible se produit en fin de mouvement, il y en a eu un autre en tout début, une période plus tôt. C'est donc peut-être l'effet de ce rafraîchissement de début qui s'observe, et non l'effet ou l'absence d'effet de celui de la fin.

Le fait que le système oculomoteur synchronise son activité de façon à ce que le rafraîchissement de la cible se positionne préférentiellement en tout début de mouvement (toujours pour des saccades qui n'en reçoivent qu'un seul) **peut signifier qu'il n'est pas souhaitable qu'un rafraîchissement se produise tardivement dans la saccade, soit parce que cela perturbe le déplacement de l'œil, soit parce que le manque d'informations lors des 2 premiers tiers du mouvement est handicapant pour la visée.** Ce qui voudrait dire que les tailles et durées, indifféremment équivalentes pour un rafraîchissement de cible se produisant en moyenne sur les 1^{er} et 2nd tiers, sont aussi des tailles et durées "optimales",

tandis que sur le troisième tiers, leur augmentation traduit l'effet d'une perturbation.

Mais si l'on reprend l'idée que les saccades produites dans des conditions de luminosité naturelle sont toujours plus grandes que celles qui s'observent en conditions d'éclairage scintillant (d'après 3), on serait tenté de conclure que l'augmentation de la taille qui est obtenue avec un rafraîchissement de cible en fin de mouvement prouve une perturbation moindre du contrôle oculomoteur, par comparaison à une localisation temporelle du signal plus proche du début de la saccade.

Un tel raisonnement ne serait cependant peut-être pas tout à fait exact, puisqu'il se base sur un parallèle, qui était fait initialement entre deux situations (la qualité du champ visuel produit par le monde naturel, et le champ scintillant des écrans cathodiques), et que l'on transpose ici dans une même condition d'observation.

Il est donc difficile de trancher sur le sens de l'effet perturbateur: augmentation ou réduction des tailles et durées moyennes ? Et par conséquent sur la zone temporelle de la saccade qui offre une possibilité de rétrocontrôle sur la motricité par l'évolution du champ visuel.

Quoiqu'il en soit, nos observations impliquent que le contrôle oculomoteur de la visée en cours de saccade existe bel et bien, puisqu'une altération de l'espace perceptif sous l'influence d'un scintillement subliminal provoque des modifications significatives des paramètres du mouvement.

Enfin, il faut remarquer que l'effet de synchronisation qui est mis en évidence dans ce travail peut résulter d'automatismes de déclenchement du mouvement, sous l'influence d'une augmentation et d'une diminution régulière de la luminance du champ visuel (on peut se reporter au chapitre 1, pages 11 et 14, sur le codage spatial et temporo-spatial réalisé par le "système où").

Ce qui signifie qu'il ne faudrait peut-être pas envisager ce phénomène comme le fruit d'une réaction au dernier rafraîchissement qui s'est produit ("déclencheur"), mais en relation avec l'ensemble de ceux qui ont eus lieu avant, durant l'élaboration du programme moteur.

Ceci signifierait que des stratégies d'anticipation sont peut-être impliquées dans les réactions de l'œil, éventuellement générées par le "phasage" des neurones avec la fréquence de scintillement. Par conséquent, **le contrôle oculomoteur ne serait peut-être pas uniquement de nature réactionnelle** (se reporter au chapitre 1, paragraphe B)1."Les caractéristiques des mouvements saccadiques des yeux", "adaptabilité", p.7)²⁴.

²⁴ Il faudrait donc envisager de vérifier si cette synchronisation se met en place au cours de la passation de l'expérience par un phénomène d'apprentissage ou d'habituation, ou si elle est présente d'emblée, impliquant un calcul "online" par le système oculomoteur.

Ce tour d'horizon des effets liés à la fréquence de rafraîchissement de l'écran fournit un certain nombre d'indices permettant de revenir s'attaquer au problème initial posé par l'aspect de la courbe des tailles moyennes des saccades (Graphique 1). Le tableau 2 suivant figure le nombre de saccades pour chaque fréquence, qui ont aussi été réparties en fonction du nombre de rafraîchissements qu'a reçus l'œil au cours de son mouvement (il s'agit du nombre de débuts de rafraîchissements de l'écran, et non du nombre de rafraîchissements de la région d'affichage des cibles):

Tableau 2

	1 rafr.	2 rafr.	3 rafr.	Effectif total
62 Hz	1218 (70,32%)	512 (29,56%)	2 (0,12%)	1732 (100%)
82 Hz	519 (29,63%)	1173 (67%)	59 (3,37%)	1751 (100%)
125 Hz	3 (0,18%)	622 (37,49%)	1034 (62,33%)	1659 (100%)

En effectuant une moyenne pondérée du nombre de rafraîchissements par saccade, on obtient les valeurs suivantes pour chaque fréquence:

Tableau 3

62 Hz	82 Hz	125 Hz
1,3	1,7	2,6

Puisque le nombre de rafraîchissements reçus en moyenne lors de chaque saccade suit une croissance proportionnelle à l'augmentation de la fréquence (62/1,3=47,7; 82/1,7=48,2; 125/2,6=48,1), et que nous n'observons pas ce phénomène pour la taille des saccades, toujours en fonction de la fréquence de rafraîchissement, il faut en déduire que nous sommes face à un problème bien particulier qui fait appel au concours de plusieurs facteurs.

On sait que **dans le monde naturel, les saccades sont de taille supérieure à celles produites en conditions d'illumination scintillante** (d'après 3). Ceci suggère qu'une taille plus importante des saccades pourrait être l'**indicateur de conditions visuelles non dégradées**. Selon une telle idée, **62Hz se révélerait être la fréquence la moins perturbante, et 82 Hz, la pire des 3 qui ont été testées**.

Or, c'est à 62 Hz que l'effet de scintillement est le plus fort, puisque le nombre de rafraîchissements de l'écran par seconde est le plus bas, et donc le plus proche du point de fusion.

Pourtant, c'est bien lorsque l'œil ne reçoit qu'un seul rafraîchissement (une majorité des saccades à 62 Hz) qu'il est capable d'adapter son activité motrice pour gérer la perturbation que représenterait une localisation intrasaccadique aléatoire de celui-ci (se reporter aussi à l'ANOVA sur la latence d'évocation, présentée p.51).

- ▷ Ainsi, on peut supposer qu'à 62 Hz, nous aurions dû observer une perturbation maximale du mouvement (se traduisant par une taille minimum). Il n'en est rien parce qu'un **mécanisme adaptatif extrêmement fin est à l'œuvre**²⁵, qui **permet de contourner la difficulté que produit un scintillement de cette fréquence (relativement à la durée que nécessite le parcours de la distance jusqu'à la cible).**
- ▷ 82 Hz se révèle être la fréquence la plus perturbatrice pour plusieurs raisons possibles. **Premièrement**, il se peut que le mécanisme adaptatif de synchronisation du départ de l'œil avec la fréquence ne soit plus permis par la situation, du fait qu'une majorité de saccades reçoit 2 rafraîchissements. **Quelle que soit la tentative du système oculomoteur pour localiser le rafraîchissement de la cible à une période du mouvement où il est le moins susceptible de perturber le contrôle de la visée, un second se produit inévitablement durant la saccade, à une position plus difficile ou impossible à gérer. Deuxièmement**, il se peut que la réception de deux rafraîchissements corresponde à deux informations différentes et en contradiction sur l'état d'un même objet, conduisant à un traitement qui prenne en compte ces deux informations pour aboutir à une position de l'œil plus ou moins déviée de sa cible. **Troisièmement**, il faut aussi considérer qu'à 82 Hz, l'interaction entre l'écart temporel qui sépare 2 rafraîchissements et la rémanence du phosphore ne permet peut-être pas une stabilité correcte du champ visuel pour qu'il ne s'avère pas perturbateur (contrairement à 125 Hz). **Il y aurait donc à 82 Hz une synergie entre plusieurs phénomènes, qui contribuerait à créer une situation plus difficile pour le contrôle moteur de la saccade.**
- ▷ A 125 Hz, la situation est encore différente: une majorité de saccades reçoit 3 rafraîchissements. **Ceux-ci étant plus rapprochés temporellement, fournissent un début de stabilité ou de continuité de la cible dans le champ visuel en mouvement. A 125 Hz, les conditions d'illumination tendraient donc à se rapprocher du monde réel, et permettraient ainsi de meilleures performances.** L'intensité du scintillement y serait amoindrie.

²⁵

Il pourrait être intéressant de vérifier cette hypothèse en modulant le nombre de rafraîchissements reçus par l'œil à 62 Hz par augmentation des excentricités des cibles évocatrices.

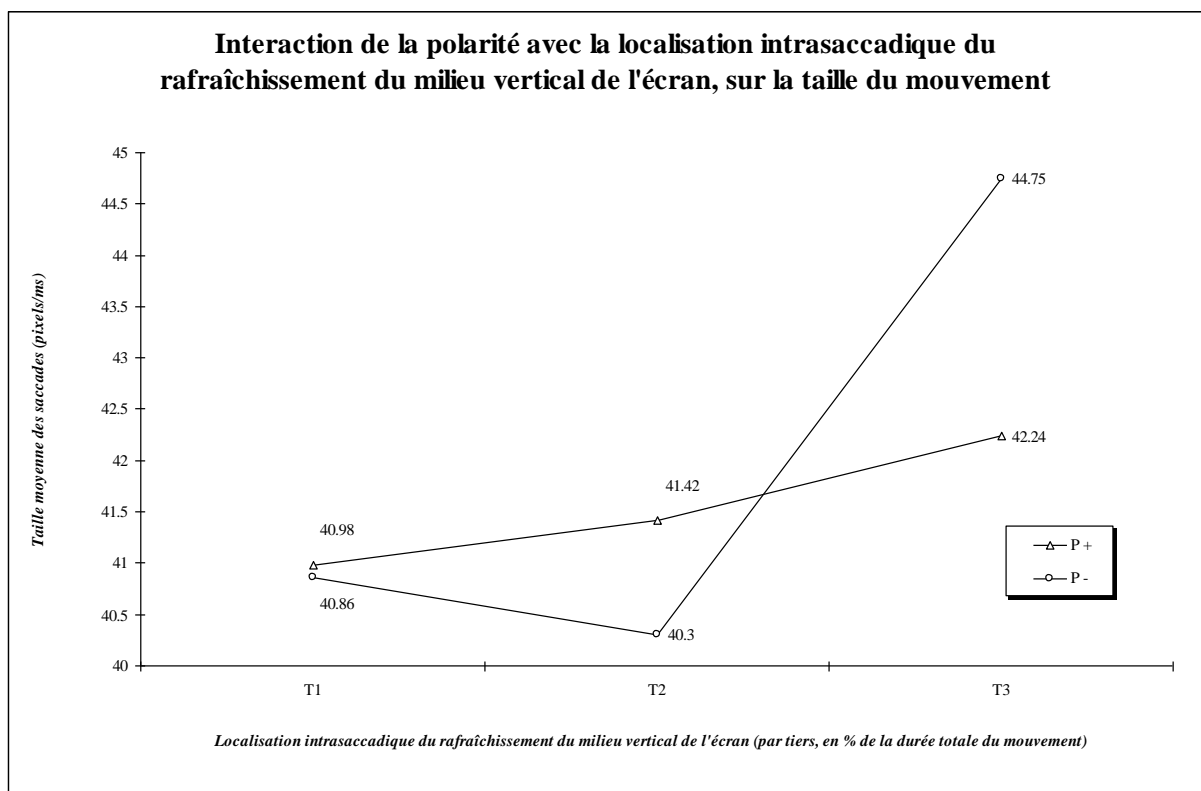
Par conséquent, la non-linéarité de l'effet que produit la fréquence sur la taille pourrait être due au fait que le système oculomoteur déploie à 62Hz une adaptation particulière, liée à la synchronisation de son activité sur la fréquence de scintillement pour en annuler le caractère perturbateur.

S'il n'en était pas ainsi, peut-être observerions-nous la modulation linéaire à laquelle on pouvait être en droit de s'attendre, avec une perturbation maximale à 62 Hz (taille minimale).

Les résultats qui ont été exposés montrent que **deux effets opposés se manifestent conjointement sur la saccade; celui de la fréquence, qui entraîne une réduction des tailles, et celui du nombre de rafraîchissements, qui les augmente.**

Plus une saccade reçoit de rafraîchissements, et plus sa taille est importante. On pourrait expliquer ce phénomène en faisant un rapprochement avec les résultats obtenus à 62Hz (un seul balayage d'écran): plus il y a de rafraîchissements, et plus leur localisation dans la saccade se décale vers la fin du mouvement, notamment sur le dernier tiers, pour lequel une taille plus grande était observée. On remarque d'ailleurs qu'il existe peut-être un continuum de sensibilité entre le début et la fin de la saccade, puisque dans le cas de la polarité positive, l'effet de la localisation intrasaccadique moyenne du rafraîchissement du milieu de l'écran sur la taille est presque parfaitement linéaire (Interaction entre la localisation intrasaccadique du rafraîchissement et la polarité: $F=3,68; p=.033$):

Graphique 12



Cependant, un tel raisonnement présente un vice de logique, puisque d'une part, des rafraîchissements se produisent aussi sur les deux premiers tiers du mouvement, pour lesquels on avait au contraire une diminution des tailles, et que d'autre part, les résultats de l'effet de la fréquence ont été obtenus sans distinction de polarité. De plus, il y a de fortes chances pour que la réception d'une seule information visuelle sur la cible en cours de saccade entraîne un traitement très différente de plusieurs.

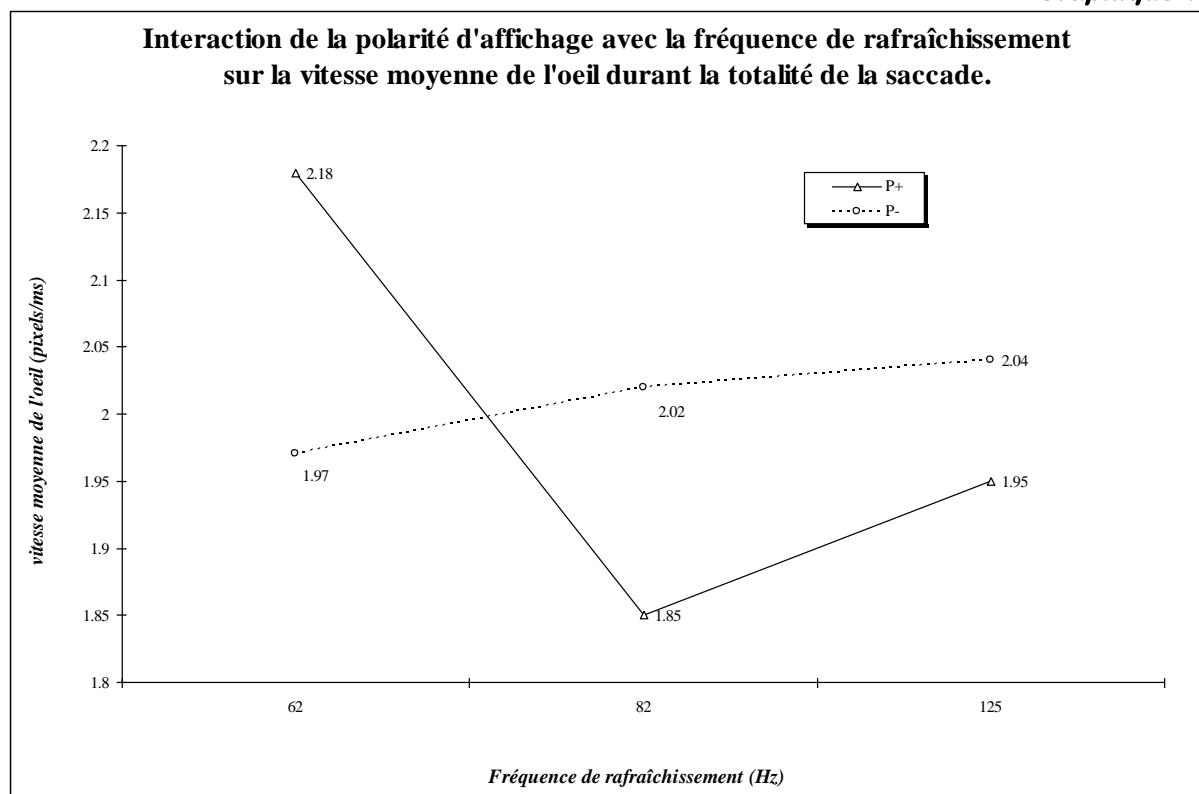
L'augmentation qui s'observe semble donc plus vraisemblablement et simplement pouvoir s'expliquer par le fait que, plus il se produit de rafraîchissements d'une cible durant le déplacement de l'œil, et plus les conditions visuelles se rapprochent de la stabilité qu'offre le monde naturel (pour lequel on sait que la taille des saccades est plus importante), **par interaction avec la rémanence du phosphore.**

B) EFFETS DE LA POLARITÉ D’AFFICHAGE:

Aucun effet n'est ressorti pour la polarité d'affichage en tant que facteur isolé ²⁶. Elle est cependant impliquée dans des interactions significatives, ce qui indique qu'elle joue tout de même un rôle sur le contrôle oculomoteur.

Alors que la fréquence et le nombre de rafraîchissements de l'écran étaient impliqués dans des variations de la taille, apparemment plutôt par modification du paramètre durée, la polarité en interaction avec d'autres facteurs ne semble jouer aucun rôle sur cet aspect dynamique du mouvement. Les effets où elle est présente semblent préférentiellement orientés vers une modulation du paramètre vitesse de l'œil, ainsi que du moment de déclenchement du mouvement. Il est difficile de fournir une explication à ces observations, qui donnent l'impression d'être face à deux processus de nature différente, selon que l'on considère l'implication ou non de la polarité. Voici quelques illustrations graphiques des résultats les plus intéressants:

Graphique 13



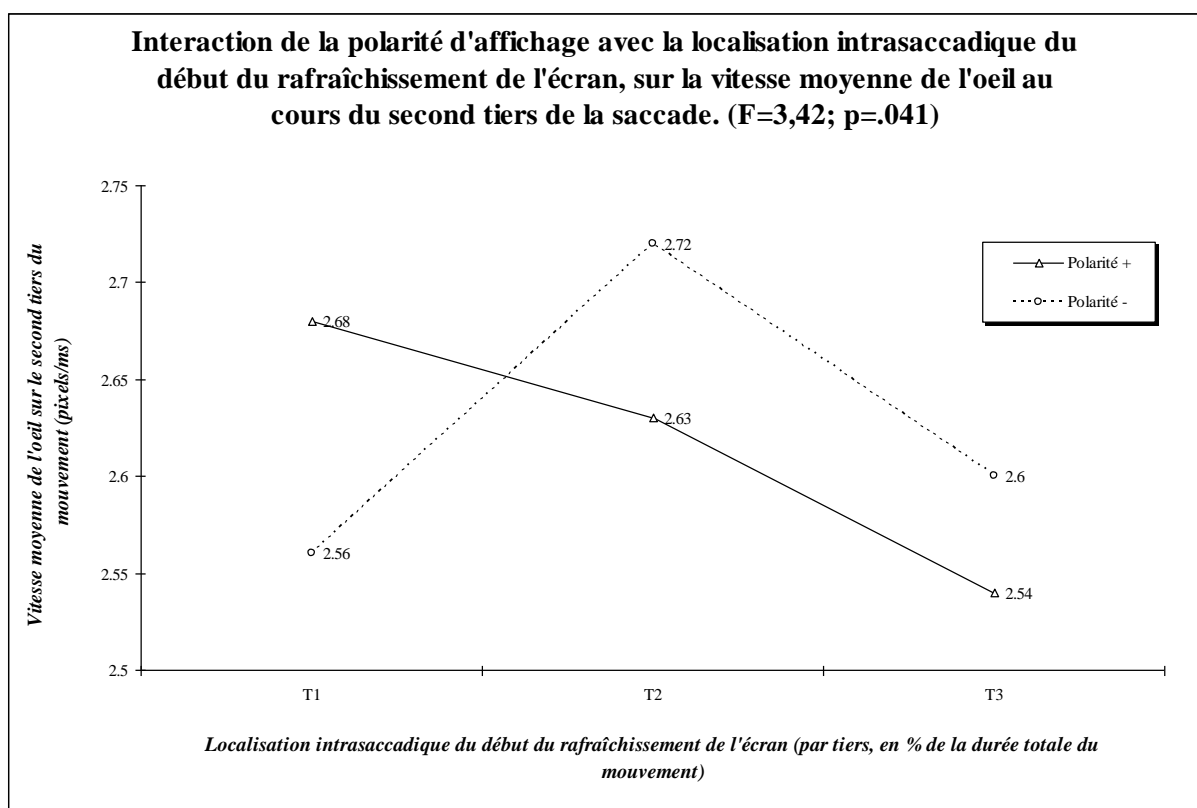
F=4; p=.023

²⁶ Effets sur la: Taille: F=1,7; p=.19 / Latence: F=1,9; p=.17 / Durée: F=0,38; p=.54 / Localisation intrasaccadique du rafraîchissement: F=0,18; p=.67 / Vitesse moyenne de l'œil: F=0,07; p=.8.

Cette interaction n'est significative qu'entre 62 et 82 Hz ($F=7,73$; $p=.008$), si l'on considère le détail des résultats fournis par l'ANOVA avec les fichiers de saccades tenant compte du nombre de rafraîchissements reçus par l'œil lors de son mouvement.

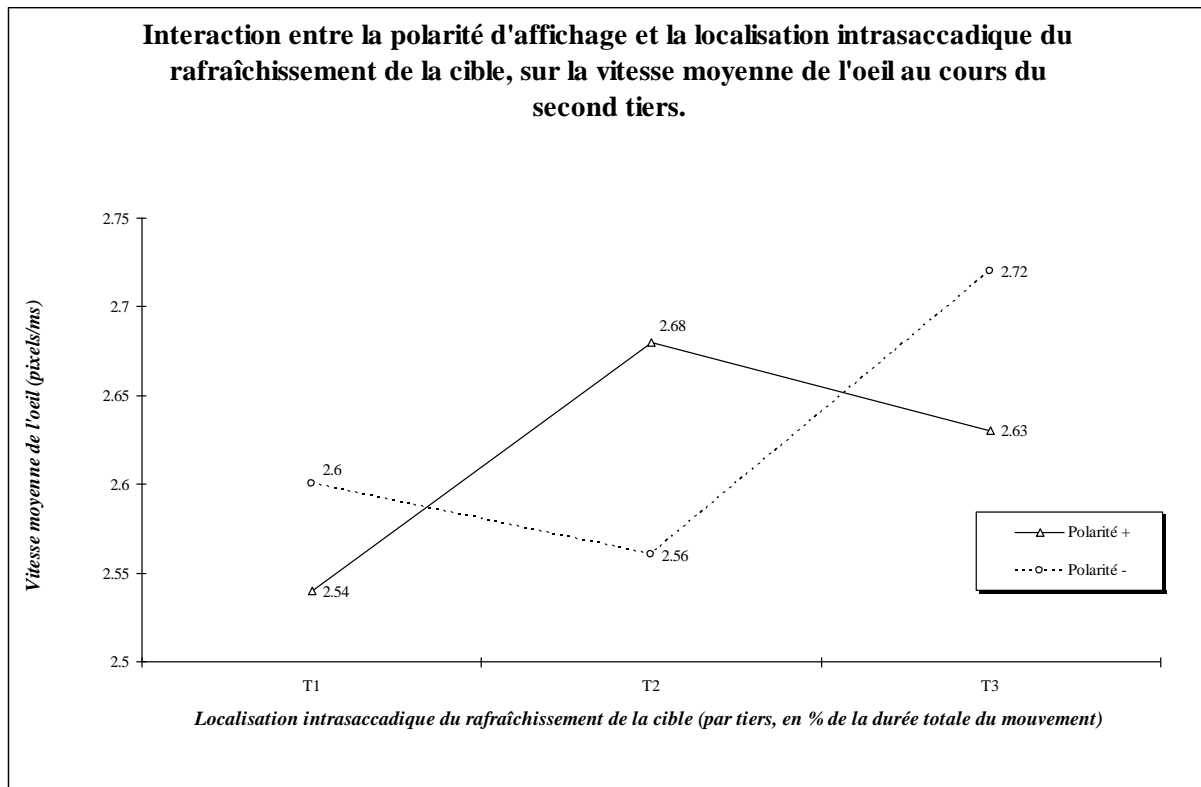
La polarité entre aussi en interaction avec la localisation intrasaccadique du début du rafraîchissement, pour influencer la vitesse moyenne de l'œil, au cours du second tiers du mouvement uniquement (saccades produites à 62 Hz, ne recevant qu'un seul rafraîchissement):

Graphique 14



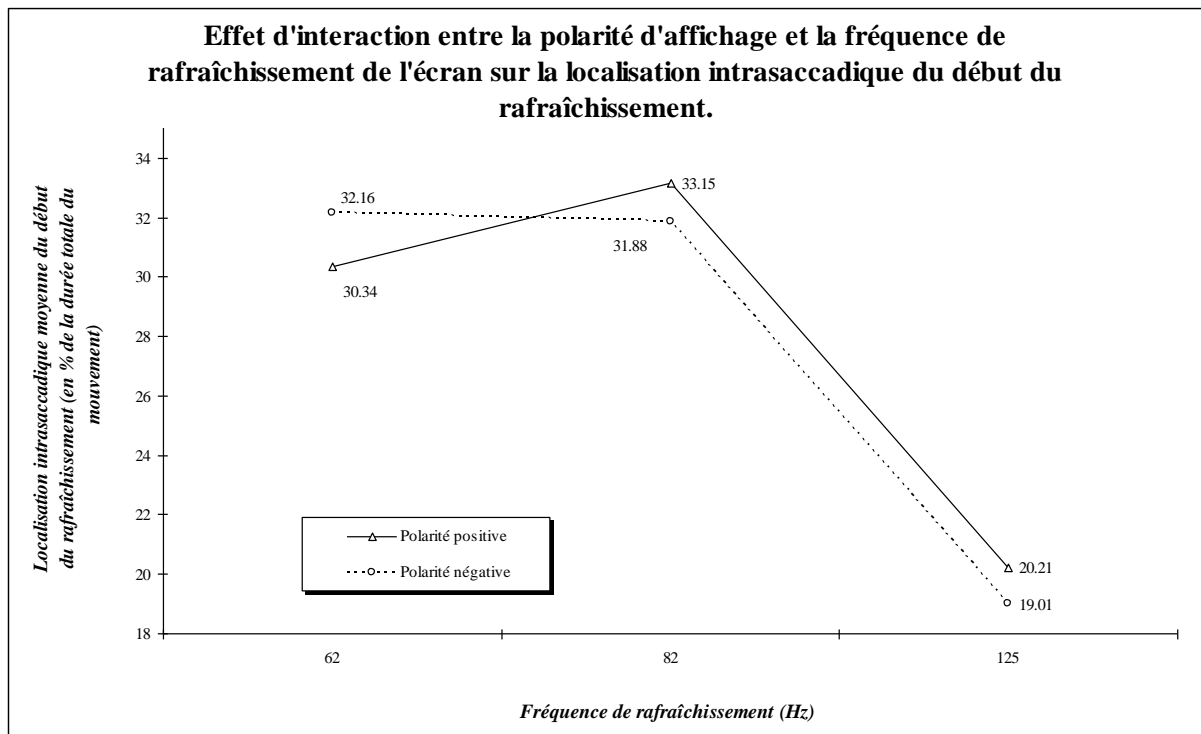
En effectuant la correction qui permet de localiser le rafraîchissement du milieu vertical de l'écran dans le mouvement (déjà explicitée dans la section A de ce chapitre), on se retrouve avec le graphique suivant:

Graphique 15



Il est intéressant de constater que les courbes des polarités positive et négative sont exactement inverses l'une par rapport à l'autre pour cet effet.

Enfin, la polarité est en interaction avec la fréquence de balayage pour influencer la localisation intrasaccadique moyenne du premier rafraîchissement qui se produit durant le mouvement de l'œil:

Graphique 16

Ceci indiquerait que l'œil synchronise différemment son départ avec la fréquence de balayage selon la polarité d'affichage. L'adaptation qu'il met en œuvre face à la fréquence du scintillement se ferait donc aussi en rapport avec la polarité.

Ces trois effets d'interaction (polarité avec la fréquence sur la vitesse moyenne de l'œil, polarité avec la fréquence sur la localisation intrasaccadique du début du rafraîchissement, et polarité avec la localisation intrasaccadique du début du rafraîchissement sur la vitesse moyenne de l'œil) semblent révéler l'existence d'un lien flou entre polarité, fréquence de balayage, localisation intrasaccadique du début du rafraîchissement de l'écran, et vitesse moyenne de l'œil.

Ainsi, le départ de l'œil ne se ferait pas de la même façon d'une polarité à l'autre en fonction de la fréquence de balayage, puisque le stimulus lumineux n'est pas identique dans les deux conditions. Ceci semble être directement responsable de la modification de la localisation du rafraîchissement dans la saccade. Par ailleurs, la sensibilité du système de contrôle oculomoteur ne semble pas être la même au cours du mouvement, selon que le stimulus lumineux est une cible scintillante ou un fond variable. L'effet qui apparaît sur la vitesse de l'œil pourrait résulter du concours de toutes ces modulations. Il reste difficile à interpréter compte tenu de la complexité apparente et du flou de la situation.

C) CONCLUSIONS:

- ▷ L'effet de **la fréquence** serait de diminuer les paramètres durée et vitesse moyenne de la saccade, entraînant ainsi une diminution de la taille.
- ▷ **Le nombre de rafraîchissements** de l'écran reçus par l'œil durant son mouvement produirait l'effet contraire.
- ▷ **La polarité** d'affichage serait impliquée dans une modulation plus ciblée du paramètre vitesse de l'œil, à travers des phénomènes d'interaction avec d'autres facteurs. Son action reste cependant difficile à cerner et à interpréter.
- ▷ Le système oculomoteur serait capable de mettre en place une **stratégie adaptative** visant à minimiser l'effet perturbateur du au scintillement du champ visuel. Celle-ci se baserait sur le principe d'une **synchronisation du départ de l'œil** avec la fréquence de rafraîchissement, dans le but de localiser le pic de luminance à un moment où il est le moins susceptible de perturber le contrôle oculomoteur.
- ▷ Il existerait un **contrôle dynamique de la visée au cours de la saccade** oculaire, guidé par l'évolution de la cible et du champ visuel en mouvement.

Nos hypothèses de recherche se trouvent vérifiées, à part, peut-être, celle concernant la polarité d'affichage, cette dernière s'avérant finalement d'une influence beaucoup plus discrète que prévu.

Enfin, certains de nos résultats semblent suggérer que le scintillement pourrait aussi affecter le système oculomoteur lorsque l'œil est immobile, alors que dans la logique du phénomène telle que je pouvais la comprendre, la perturbation serait née d'une instabilité du champ visuel sous l'effet combiné du scintillement et du mouvement rapide de l'œil.

CONCLUSION

CONCLUSION

Il ressort de cette étude que la technologie actuelle des écrans cathodiques semble mal adaptée aux caractéristiques du système humain de traitement de l'information sensori-motrice visuelle.

Elle montre que la fréquence de balayage de l'écran, et son corollaire, le nombre de rafraîchissements qui se produisent au cours de la saccade oculaire, modulent les paramètres durée et vitesse du mouvement, conduisant à une position d'arrivée de l'œil modifiée.

Elle met aussi en évidence l'existence de réactions adaptatives du système oculomoteur, visant à contrecarrer l'effet perturbateur du scintillement de l'écran ou des cibles, par synchronisation du départ de l'œil sur les variations régulières de la luminance des stimuli.

Ce phénomène a permis de montrer qu'il existerait un contrôle dynamique de la visée au cours de la saccade.

Pour ce qui concerne la polarité d'affichage, les résultats sont moins nets. Ils ne permettent pas d'affirmer que la polarité est un facteur déterminant, contrairement à ce que la logique aurait voulu, du fait qu'elle contribue à générer deux types de stimulus différents. Pourtant, ils révèlent qu'elle jouerait quand même un rôle, en interaction avec d'autres facteurs, surtout orienté vers une modulation du paramètre vitesse.

Les tubes cathodiques employés couramment scintillent à une fréquence de l'ordre de 70 Hz, qui, selon nos résultats, s'avérerait être dans la tranche la plus perturbatrice pour le fonctionnement oculomoteur. Bien sûr, pour être certain de ceci, il faudrait avoir recours à une étude supplémentaire, qui s'attacherait à vérifier que 82 Hz n'était pas la fréquence la plus perturbatrice à cause de l'excentricité choisie dans cette expérience (qui définit aussi le nombre de rafraîchissements reçus par l'œil pendant son mouvement). Dans le cas où la confirmation de ce phénomène serait obtenue, elle soulèverait un problème d'importance pour les chercheurs qui utilisent des ordinateurs dans leurs protocoles de recueil de données, en psychologie notamment.

Car le scintillement subliminal des images générées par les écrans cathodiques pourrait alors s'avérer être inducteur de biais expérimentaux, puisqu'il modifie les traitements sensori-moteurs de l'œil à la base de toute prise d'information visuelle. On peut le voir de manière flagrante avec les variations de la PPF (correspondant à ce qui était traité comme taille des saccades dans cette étude) selon la fréquence et/ou le nombre de rafraîchissements reçus par l'œil pendant son mouvement.

Il y aurait donc matière à étudier les effets du scintillement subliminal des écrans cathodiques sur les processus cognitifs de haut niveau, car il n'est pas exclu, suite à de tels résultats, que des facultés supérieures ne soient affectées par ce type de dégradation informationnelle du champ visuel.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

1. **Abrams, R.A., Dobkin, R.S. et Helfrich, M.K.** (1992). Adaptative modification of saccadic eye movements. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, 18, 4, 922 - 933.
2. **Baccino, T. et Pynte, J.** (1997). Exploring the flicker effect: the influence of in-flight pulsations on saccadic control. (soumis à publication).
3. **Baccino, T.** (1996). Lecture sur écrans: aspects psychologiques. Habilitation à diriger les recherches, Nice.
4. **Becker, W. et Jürgens, R** (1979). An analysis of the saccadic system by means of double step stimuli. *Vision research*, 19, 967 - 983.
5. **Becker, W., Kieffer, G. et Jürgens, R.** (1987). - Oculomotor programming. Neurophysiological aspects. Sensory stimulation can interrupt or perturb saccades in mid-flight. In G. Luer et U. Lass (Eds), *Fourth European conference of eye movements*, pp 103 - 105. New-York: academic press.
6. **Berthoz, A. et Petit, L.** (1996). Les mouvements du regard, une affaire de saccades. *La recherche*, 289, 58 - 65.
7. **Bridgeman, B. et Macknik, S.L.** (1995). Saccadic suppression relies on luminance information. *Psychological research*, 58, 163 - 168.
8. **Carpenter, R.H.S. et Williams, M.L.L.** (1995). Neural computation of log likelihood in control of saccadic eye movements. *Nature*, 377, 59 - 62.
9. **Coëffé, C. et O'Regan, J.K.** (1987). Reducing the influence of non-target stimuli on saccade accuracy: predictability and latency effects. *Vision research*, 27, 2, 227 - 240.
10. **Deubel, H. , Wolf, W. et Hauske, G.** (1984). The evaluation of the oculomotor error signal. *Theoretical and applied aspects of eye movements research*, 55 - 62.
11. **Doré, K.** (1996). Le fonctionnement du système saccadique pendant la lecture. La programmation de la saccade vers un mot. *Thèse de doctorat*, Paris.
12. **Eysel, U.T. et Burandt, U.** (1984). Fluorescent tube light evokes flicker responses in visual neurons. *Vision research*, 24, 3, 943 - 948.
13. **Hubel, D.** (1994). L'oeil, le cerveau et la vision. Les étapes cérébrales du traitement visuel. *Pour la science*, coll. l'univers des sciences, Paris.

14. **Ilg, U.J., et Hoffmann, K.P.** (1993). Motion perception during saccades. *Vision research*, 33, 2, 211 - 220.
15. **Kapoula, Z.** (1985). Research note: evidence for a range effect in the saccadic system. *Vision research*, 25, 8, 1155 - 1157.
16. **Kennedy, A. et Murray, W.S.** (1991). The effects of flicker on eye movement control. *The quarterly journal of experimental Psychology*, 43 A, 1, 79 - 99.
17. **Kennedy, A. et Murray, W.S.** (1993). Flicker on VDU screens. *Nature*, 365, 213.
18. **Kennedy, A. et Murray, W.S.** (1996). Eye movement control during the inspection of words under conditions of pulsating illumination. *European Journal of Cognitive Psychology*, 8, 4, 381 - 403.
19. **Levy-Schoen, A. et Findlay, J.M.** (1984). Codages spatiaux dans l'ajustement des mouvements des yeux. *Comportements*, 1, 23 - 43.
20. **Macknik, S.L., Fisher, B.D., et Bridgeman, B.** (1991). Flicker distorts visual space constancy. *Vision research*, 31, 12, 2057 - 2064.
21. **Matin, E.** (1974). Saccadic suppression. A review and an analysis. *Psychological bulletin*, 81, 12, 899 - 916.
22. **Morisson, R.E.** (1984). Manipulation of stimulus onset delay in reading: evidence for parallel programming of saccades. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, 10, 5, 667 - 682.
23. **O'Regan, J.K.** (?). Les vrais mystères de la vision. Groupe regard, CNRS, EHESS, EPHE, Université René Descartes, Paris.
24. **O'Regan, J.K. et Jacobs, A.M.** (1992). Optimal viewing position effect in word recognition: a challenge to current theory. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, 18, 1, 185 - 197.
25. **Pouliquen, Y.** (1983). Précis de (ref ?). Masson, Paris.
26. **Ryan, S.J.** (1989). Retina, vol.1. Basic science and inherited retinal disease - Tumors. The CV Mosby company, St.Louis, Baltimore, Toronto.
27. **Sole, P., Dalens, H. et Gentou, C.** (1992). Biophtalmologie. Masson, Paris.
28. **Verfaillie, K., De Troy, A. et Van Rensbergen, J.** (1994). Transsaccadic integration of biological motion. *Journal of experimental psychology: learning, memory and cognition*, 20, 3, 649 - 670.
29. **Volkman, F.C.** (1986). Human visual suppression. *Vision research*, 26, 9, 1401 - 1416.
30. **Wilkins, A.** (1995). Visual stress. Oxford University press.

ANNEXES

DONNÉES BRUTES

TÉLÉCHARGER LE FICHIER

DataDEALachaud.xls

TABLEAUX DE RÉSULTATS

Polarités positive et négative

Paramètre	Facteur	F	p
Taille	Fréquence	3.14	.05
	Latéralité	40.78	0
Latence	(<i>Latéralité</i>)	3.36	.07
	Fréquence * Caractère	3.88	.025
	Polarité * Latéralité * Caractère	8.16	.006
Durée	Latéralité	46.58	0
Localisation intrasaccadique (en % de la durée)	Polarité * Fréquence	3.91	.025
	Fréquence * Latéralité	11.97	.00004
	Polarité * Latéralité * Caractère	4.8	.032
Vitesse moyenne	Latéralité	38.99	0
	Polarité * Fréquence	4	.023
	Polarité * Caractère	4.51	.037
	Fréquence * Latéralité * Caractère	3.41	.039

62 et 82 Hz, 1 et 2 rafraîchissements, polarités + et -

Paramètre	Facteur	F	p
Taille	Fréquence	12.6	.0009
	Latéralité	14.64	.0004
	Nombre de rafraîchissements	104.86	0
	Fréquence * nbre de rafr	4.06	.05
	Latéralité * nbre de rafr	6.84	.012
	Polarité * Fréquence * nbr de rafr	4.64	.037
	Polarité * Latéralité * Caractère * nbr de rafr	5.03	.03
Latence	Nombre de rafraîchissements	6.13	.017
	Latéralité * nbr de rafr	6.48	.015
	Polarité * Fréquence * Latéralité	5.18	.028
	Polarité * Fréquence * nbr de rafr	7.25	.01
Durée	Fréquence	5.83	.02
	Latéralité	38.51	0
	Nombre de rafraîchissements	161.05	0
	Polarité * nbr de rafr	4.05	.05
	Fréquence * nbre de rafr	5.11	.029
	Latéralité * nbre de rafr	12.08	.001
	(Polarité * Fréquence * nbr de rafr)	3.98	.052
Localisation intrasaccadique (en % de la durée)	Latéralité	10.79	.002
	(Polarité * Fréquence)	3.49	.068
	Latéralité * nbr de rafr	8.82	.005
	Polarité * Latéralité * Caractère	6.52	.014
	(Polarité * Caractère * nbr de rafr)	3.45	.07
	Polarité * Fréquence * Caractère * nbre de rafr	8.31	.006
Vitesse moyenne	Fréquence	5.38	.025
	Latéralité	22.27	.00002
	Nombre de rafraîchissements	47.93	0
	Polarité * Fréquence	7.73	.008
	Polarité * Caractère	5.01	.03
	Fréquence * nbr de rafr	6.18	.017
	Polarité * Latéralité * Caractère * Nbr de rafr	6.54	.014

82 et 125 Hz, 2 et 3 rafraîchissements, polarités + et -

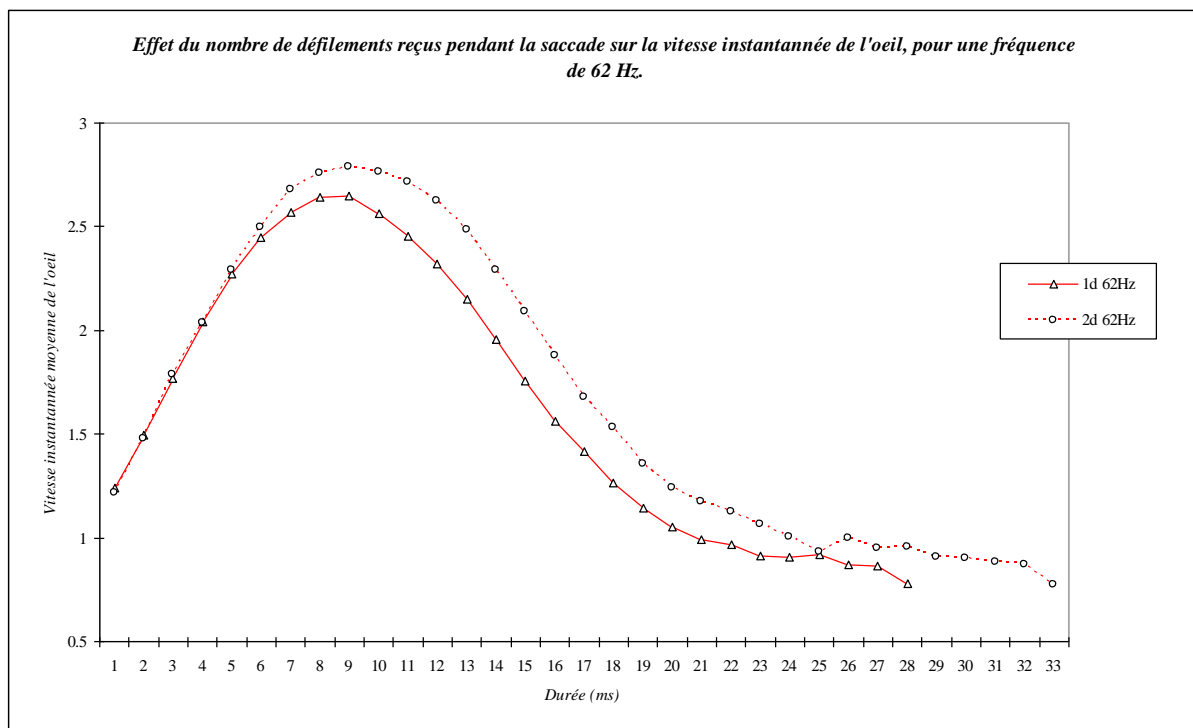
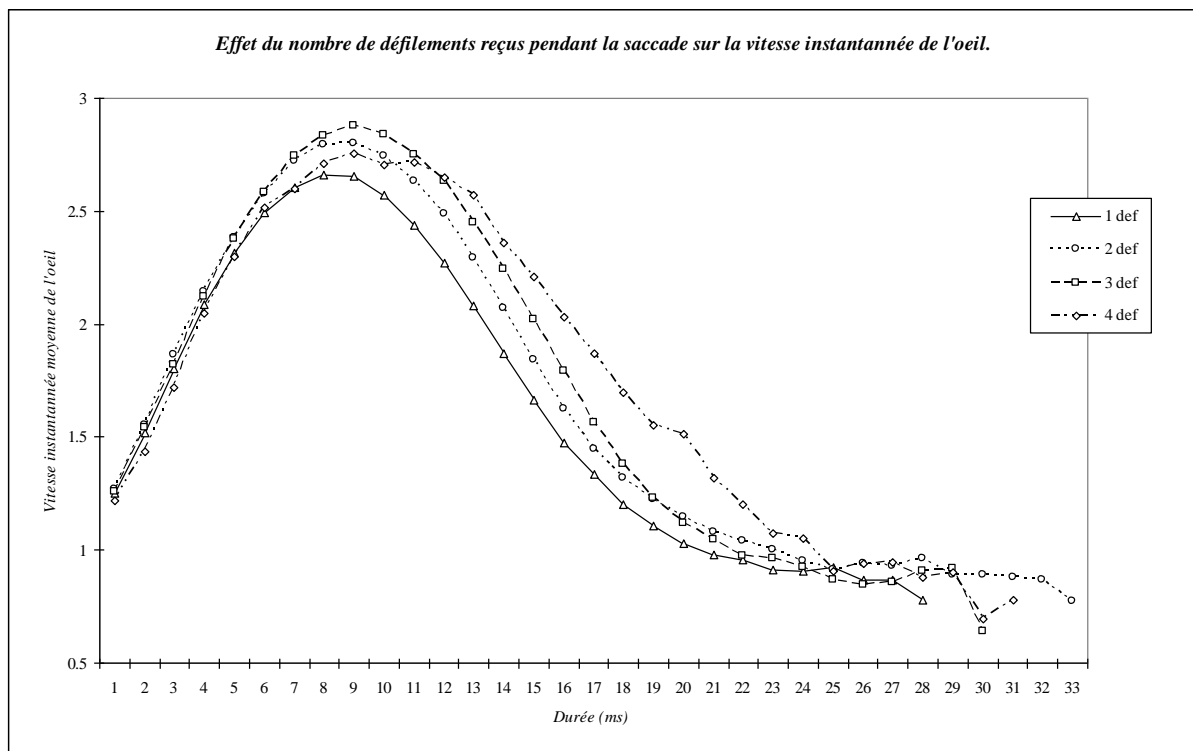
Paramètre	Facteur	F	p
Taille	Fréquence	8.29	.006
	Latéralité	87.78	0
	Nombre de rafraîchissements	70.13	0
	Latéralité * Nbr de rafr	9.98	.003
	Polarité * Latéralité * Caractère	8.57	.005
	Fréquence * Latéralité * Caractère	6.05	.018
	Polarité * Fréquence * Latéralité * Nbre de rafr	5.44	.024
Latence	(Caractère)	3.85	.056
	(Fréquence * Caractère)	3.89	.055
	Latéralité * Caractère	4.47	.04
Durée	Fréquence	28.61	.000003
	Latéralité	58.4	0
	Nombre de rafraîchissements	190.41	0
	Fréquence * Latéralité	11.41	.0015
	Latéralité * Nbr de rafr	14.95	.0004
	Latéralité * Caractère * nbr de rafr	4.17	.047
	Polarité * Fréquence * Latéralité * Caractère	6.37	.015
Localisation intrasaccadique (en % de la durée)	Polarité	4.46	.041
	Latéralité	4.14	.048
	Fréquence * Latéralité * nbr de rafr	5.01	.03
	(Fréquence * Latéralité * Caractère * nbr de rafr)	3.97	.052
Vitesse moyenne	Latéralité	59.4	0
	Nombre de rafraîchissements	8.07	.007
	Latéralité * Caractère	7.62	.008
	(Polarité * nbr de rafr)	3.48	.069
	Fréquence * Latéralité * Caractère	7.62	.008

1 Rafraîchissement, 62 Hz

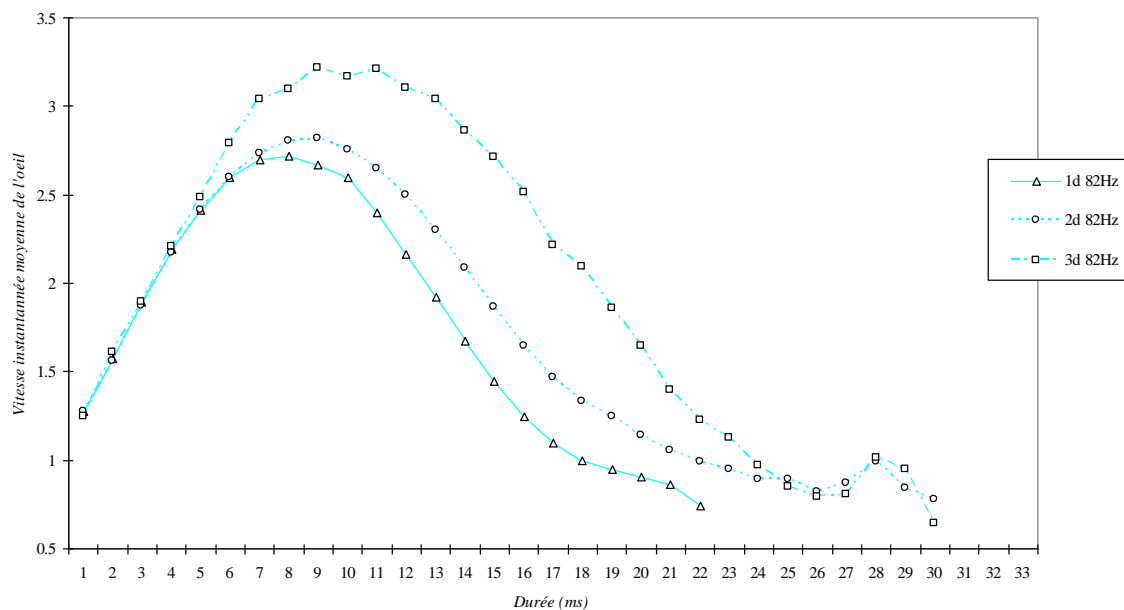
Paramètre	Facteur	F	p
Taille	Polarité	5.71	.026
	Localisation	4.33	.019
	Polarité * Latéralité * Caractère	6.84	.016
Durée	Latéralité	9.86	.005
	Localisation	11.99	.00007
	(Polarité * Localisation)	2.85	.068
	(Polarité * Localisation * Latéralité)	3	.06
Localisation intrasaccadique en % de la durée	Polarité * Localisation	7.01	.002
Vitesse moyenne (Tiers 1)	Latéralité	4.39	.048
	(Polarité * Localisation)	3.03	.058
	Polarité * Latéralité * Caractère	8.52	.008
	(Polarité * Latér * Car * Loca)	3.02	.059
Vitesse moyenne (Tiers 2)	Localisation	4.64	.015
	Polarité * Latéralité * Caractère	6.06	.022
	Polar * Latér * Car * Loca	3.83	.029
Vitesse moyenne (Tiers 3)	(Polarité)	4.08	.056
	Polar * Latér * Car * Loca	6.45	.0035

DONNÉES COMPLÉMENTAIRES

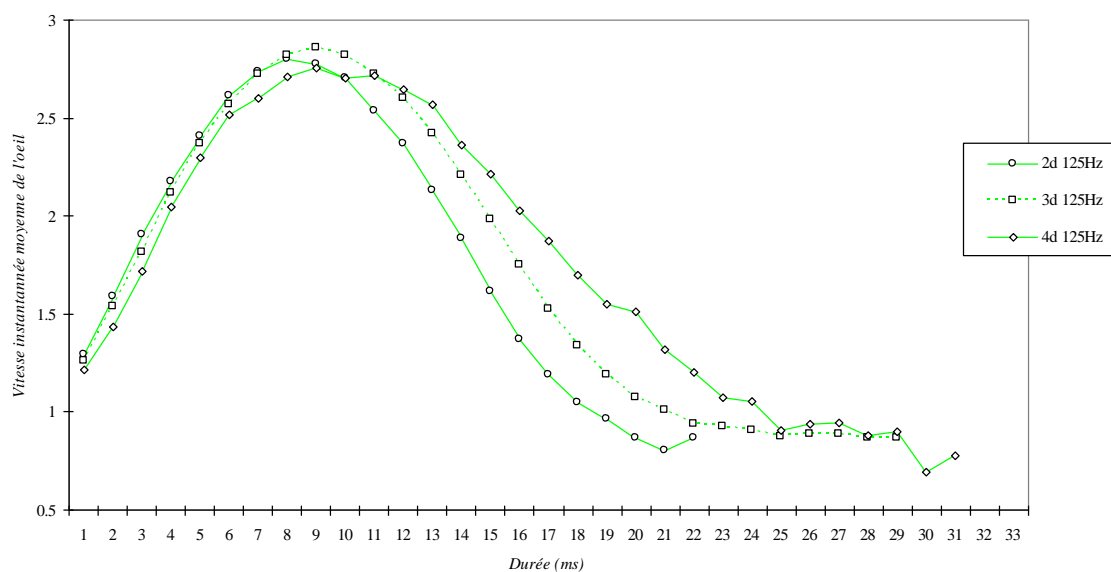
POLARITÉ NÉGATIVE



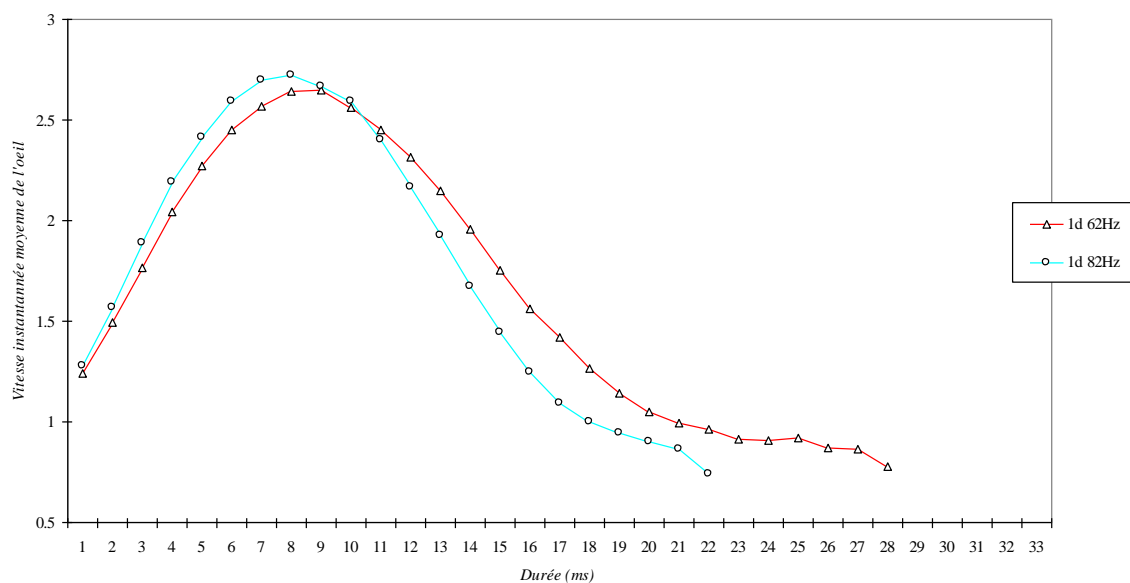
Effet du nombre de défilements reçus pendant la saccade sur la vitesse instantannée de l'oeil, pour une fréquence de 82 Hz.



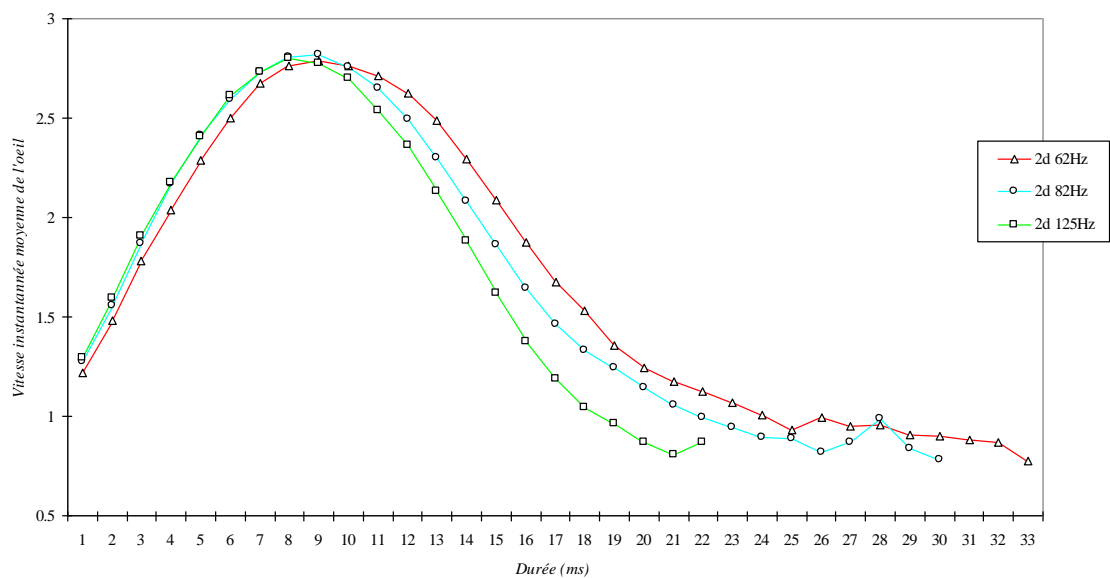
Effet du nombre de défilements reçus pendant la saccade sur la vitesse instantannée de l'oeil, pour une fréquence de 125 Hz.



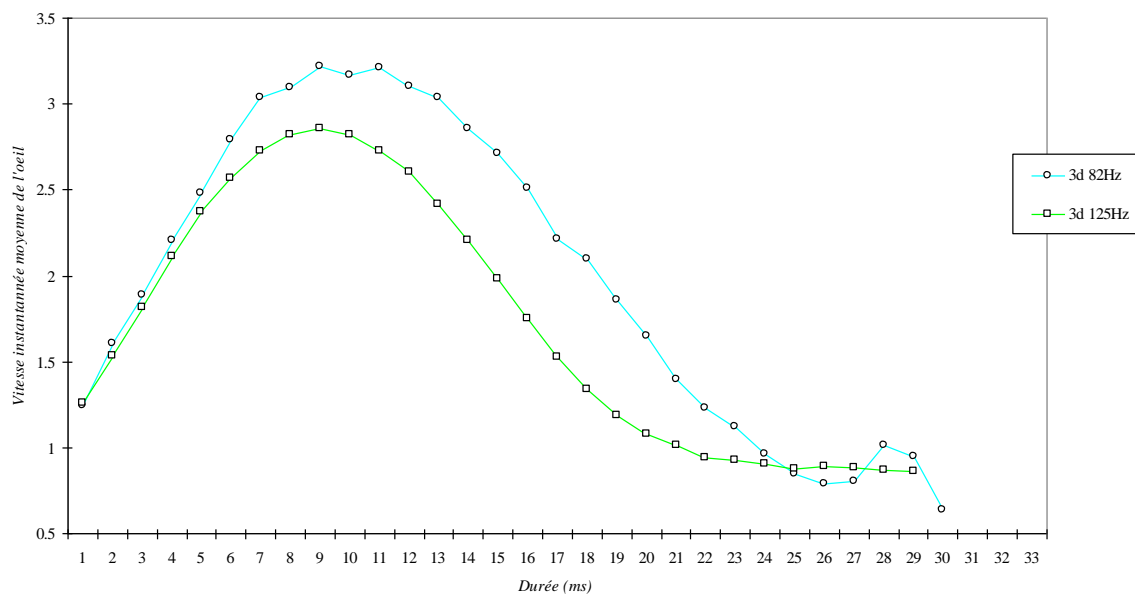
Effet de la fréquence de rafraîchissement d'écran sur la vitesse instantannée de l'oeil, pour des saccades recevant 1 défilement.



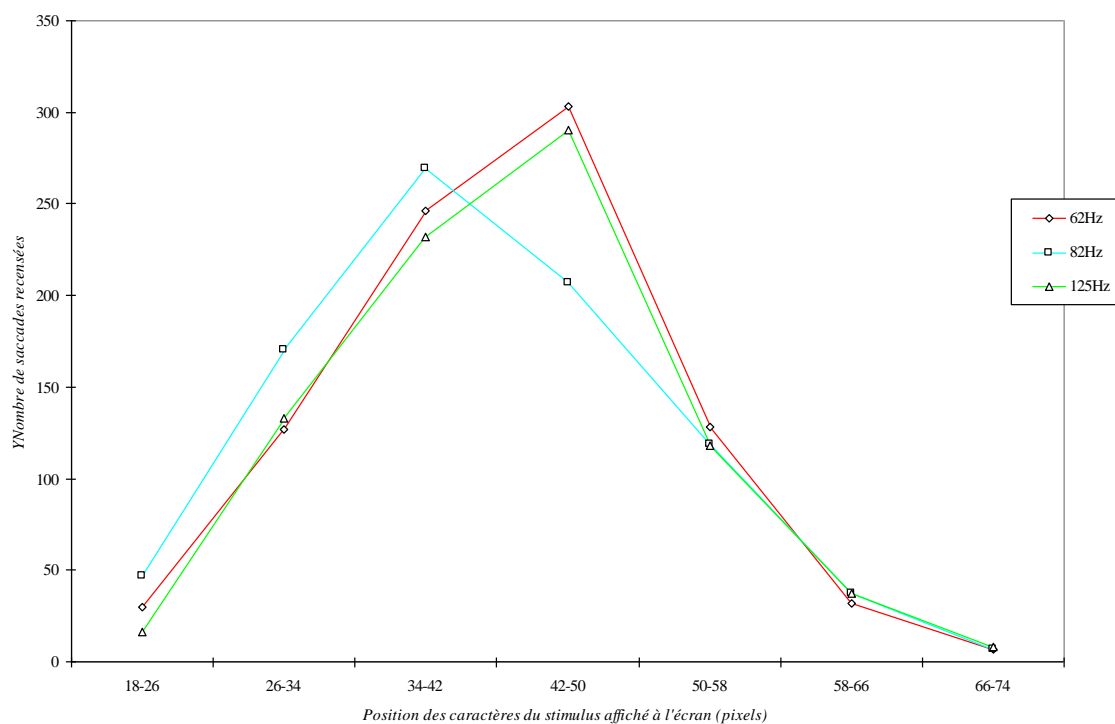
Effet de la fréquence de rafraîchissement d'écran sur la vitesse instantannée de l'oeil, pour des saccades recevant 2 défilements.



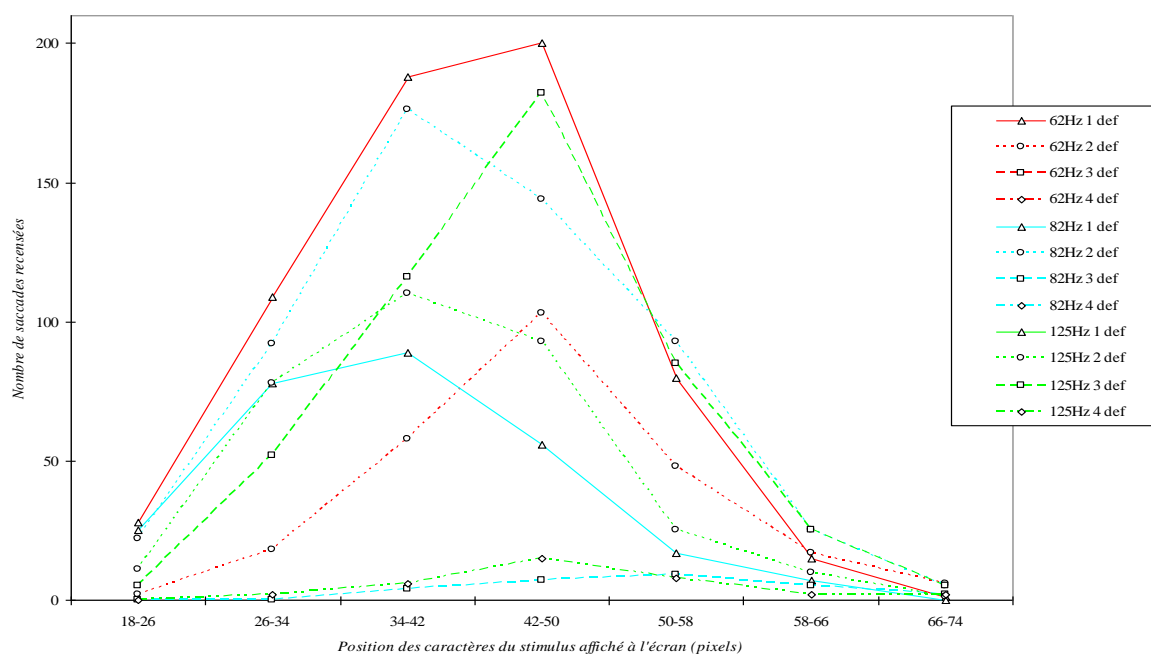
Effet de la fréquence de rafraîchissement d'écran sur la vitesse instantanée de l'oeil, pour des saccades recevant 3 défilements.



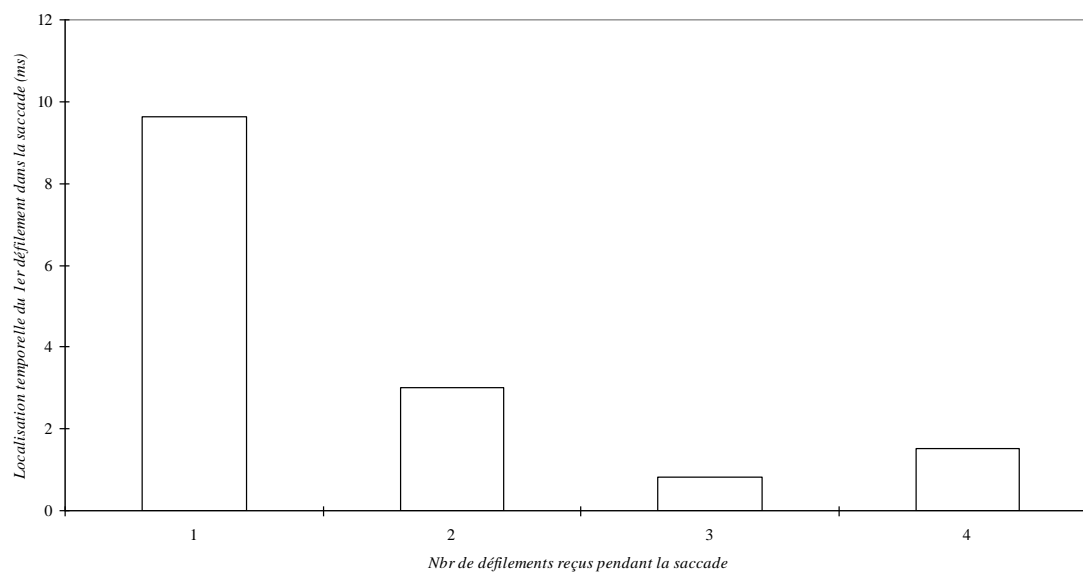
Distribution du nombre de saccades pour les positions moyennes de chaque caractère du stimulus affiché en fonction de la fréquence de rafraîchissement d'écran utilisée.



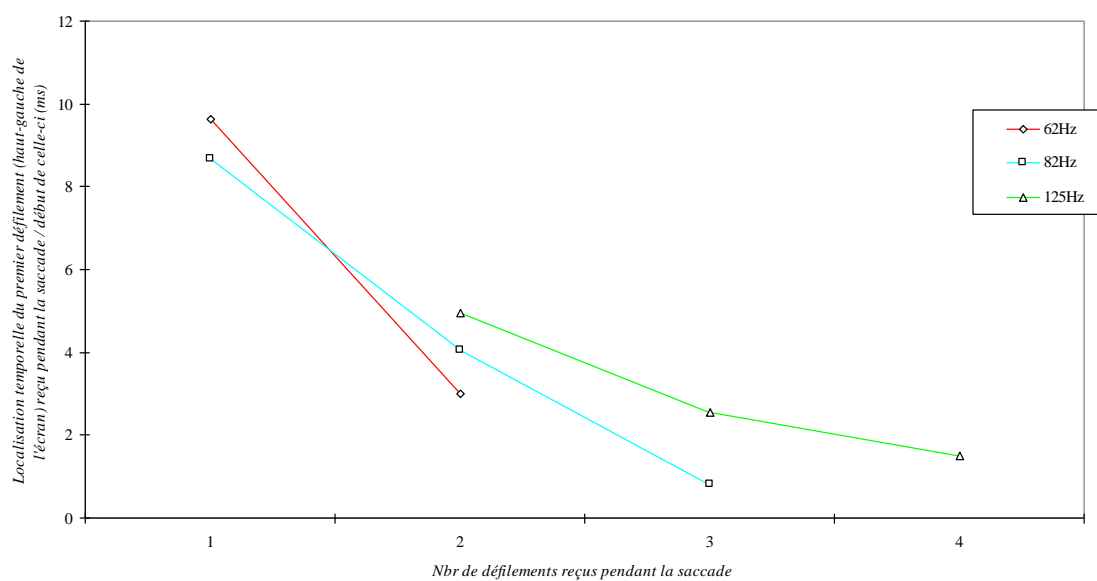
Distribution du nombre de saccades pour les positions moyennes de chaque caractère du stimulus affiché, en fonction de la fréquence de rafraîchissement d'écran utilisée, et du nombre de défilements reçus durant la saccade.



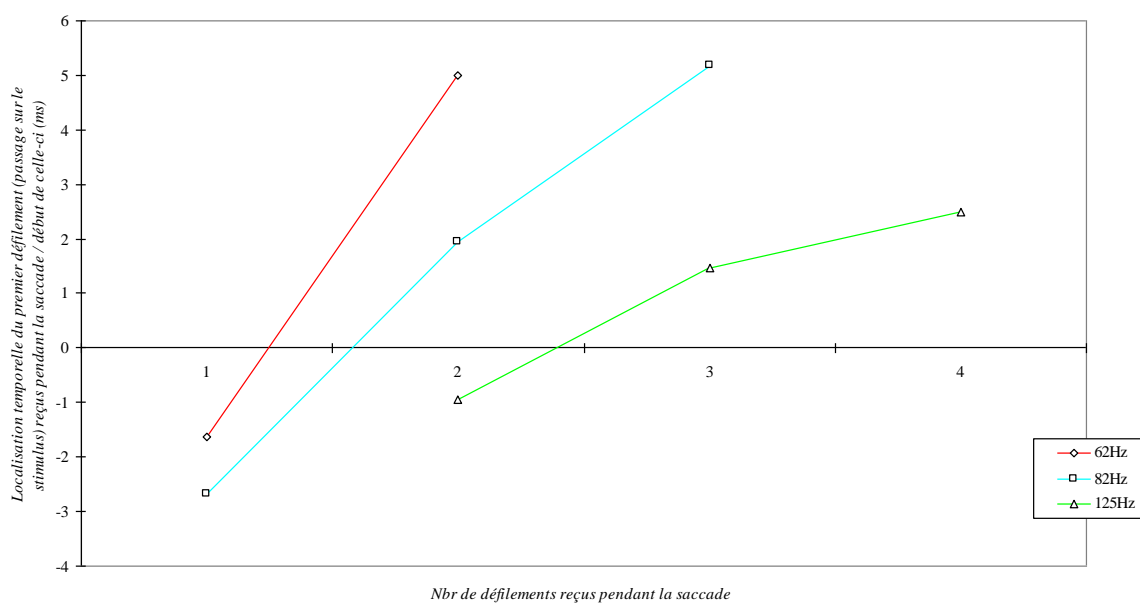
Effet de synchronisation du mouvement de l'oeil sur le rafraîchissement de l'écran, en fonction du nombre de défilements reçus pendant la saccade.



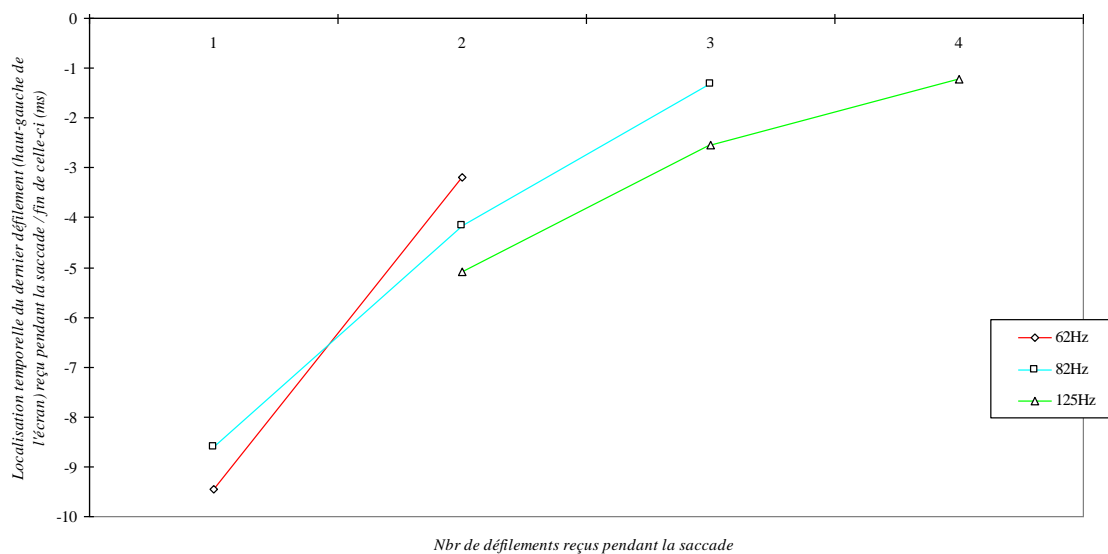
Effet de synchronisation temporelle du mouvement de l'oeil avec le début de rafraîchissement de l'écran (haut-gauche), par rapport au début de la saccade et au nombre de défilements reçus pendant le mouvement.



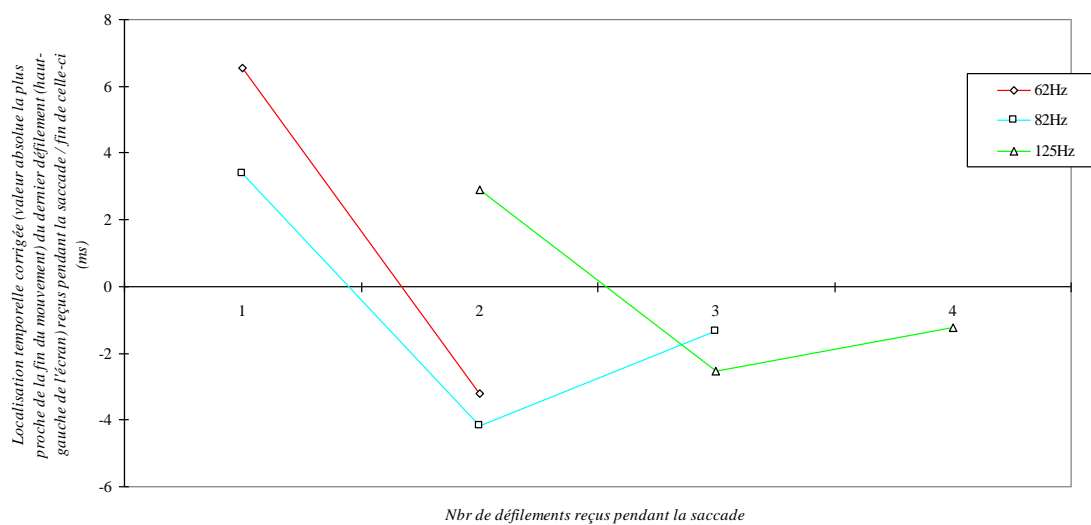
Effet de synchronisation temporelle du mouvement de l'oeil sur l'illumination du stimulus par le faisceau d'électrons, par rapport au début de la saccade et au nombre de défilements reçus pendant le mouvement.



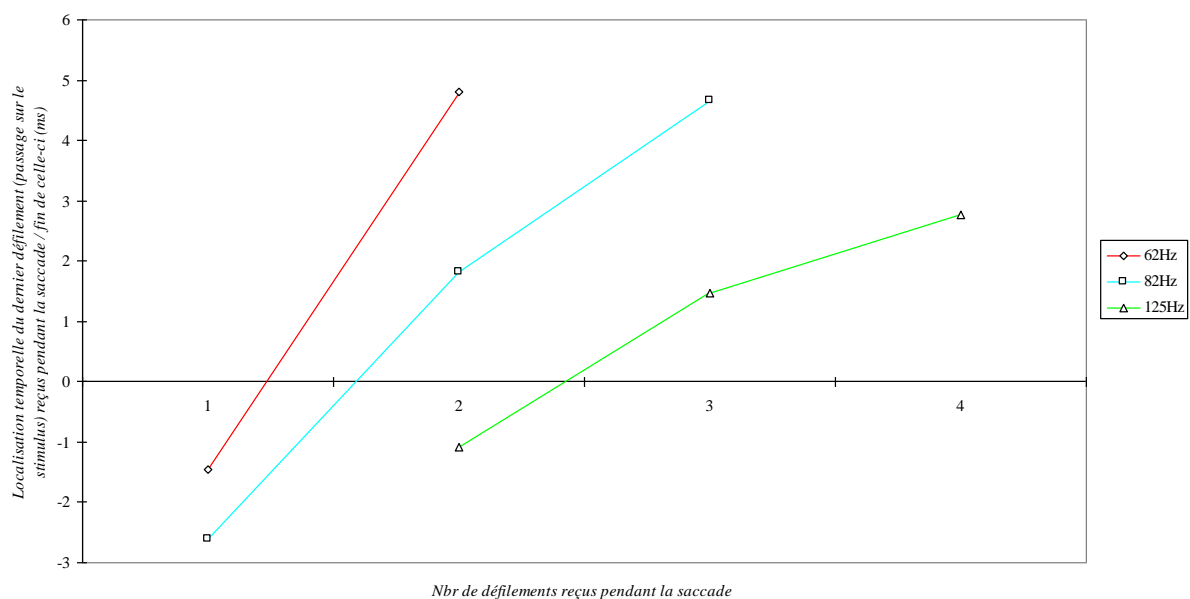
Effet de synchronisation temporelle du mouvement de l'oeil avec le début d'un rafraîchissement d'écran (haut-gauche), par rapport à la fin de la saccade et au nombre de défilements reçus pendant le mouvement.



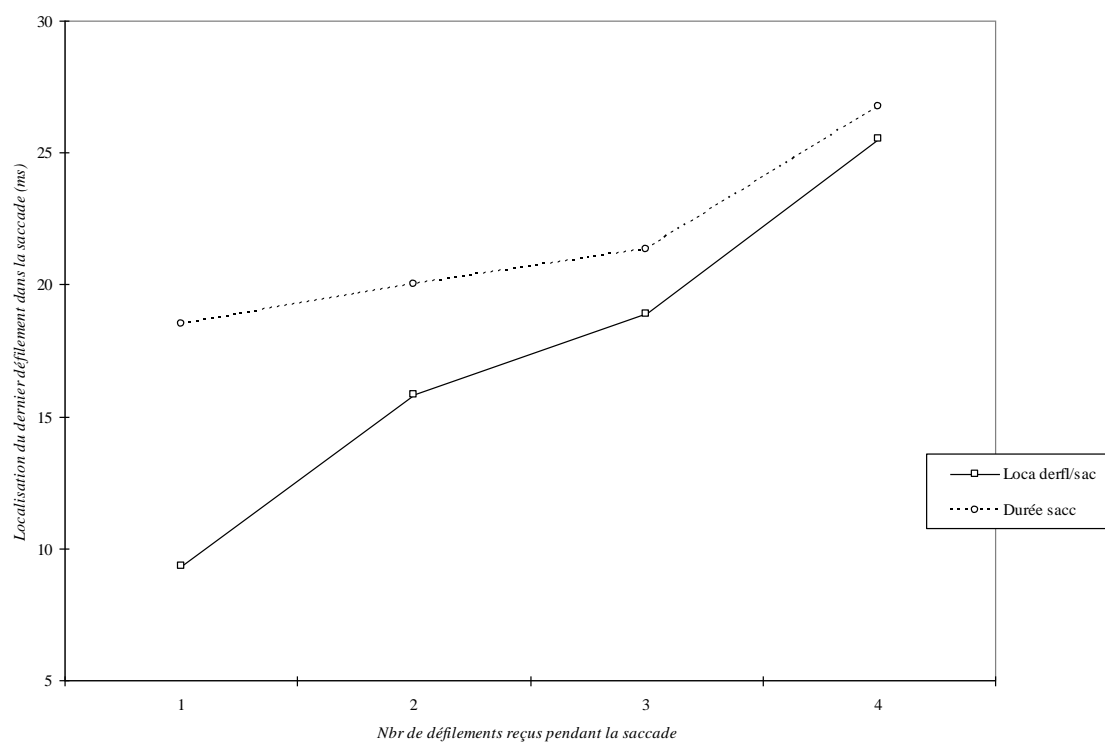
Effet de synchronisation temporelle du mouvement de l'oeil avec le début d'un rafraîchissement (haut-gauche de l'écran), par rapport à la fin de la saccade (valeur absolue la plus proche) et au nombre de défilements reçus pendant le mouvement.



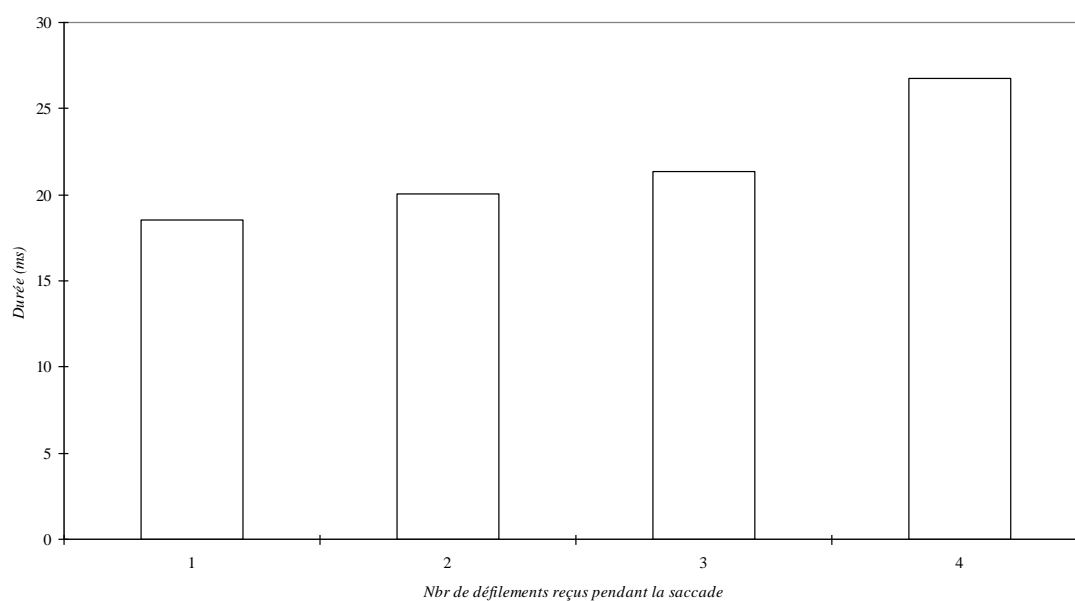
Effet de synchronisation temporelle du mouvement de l'oeil sur l'illumination du stimulus par le faisceau d'électrons, par rapport à la fin de la saccade et au nombre de défilements reçus pendant le mouvement.



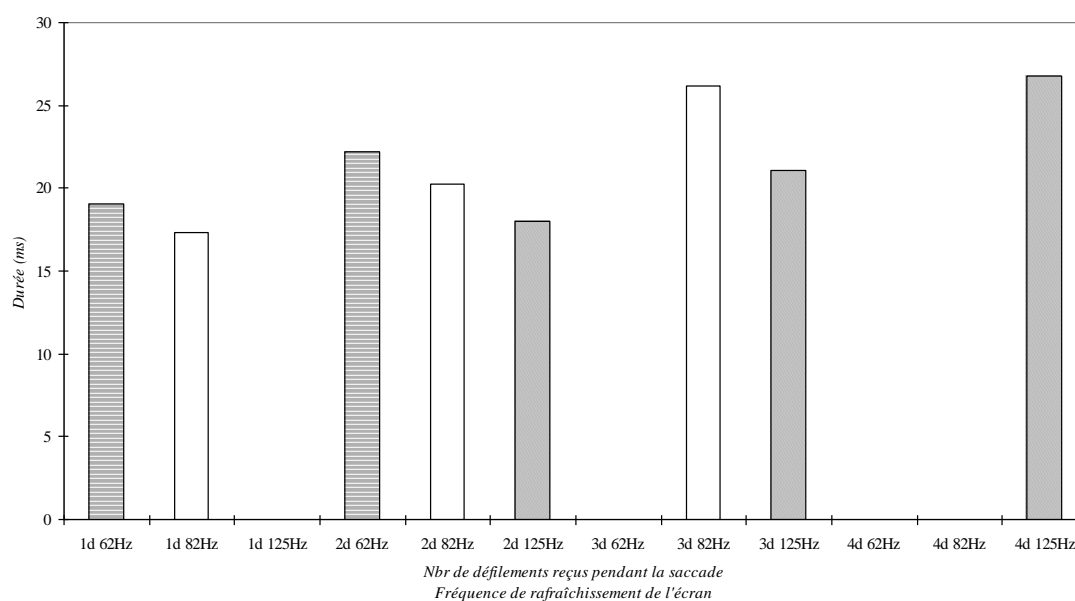
Comparaison entre la durée de la saccade et la localisation temporelle du dernier défilement reçu par l'oeil en mouvement, en fonction du nombre de défilements reçus durant la saccade.

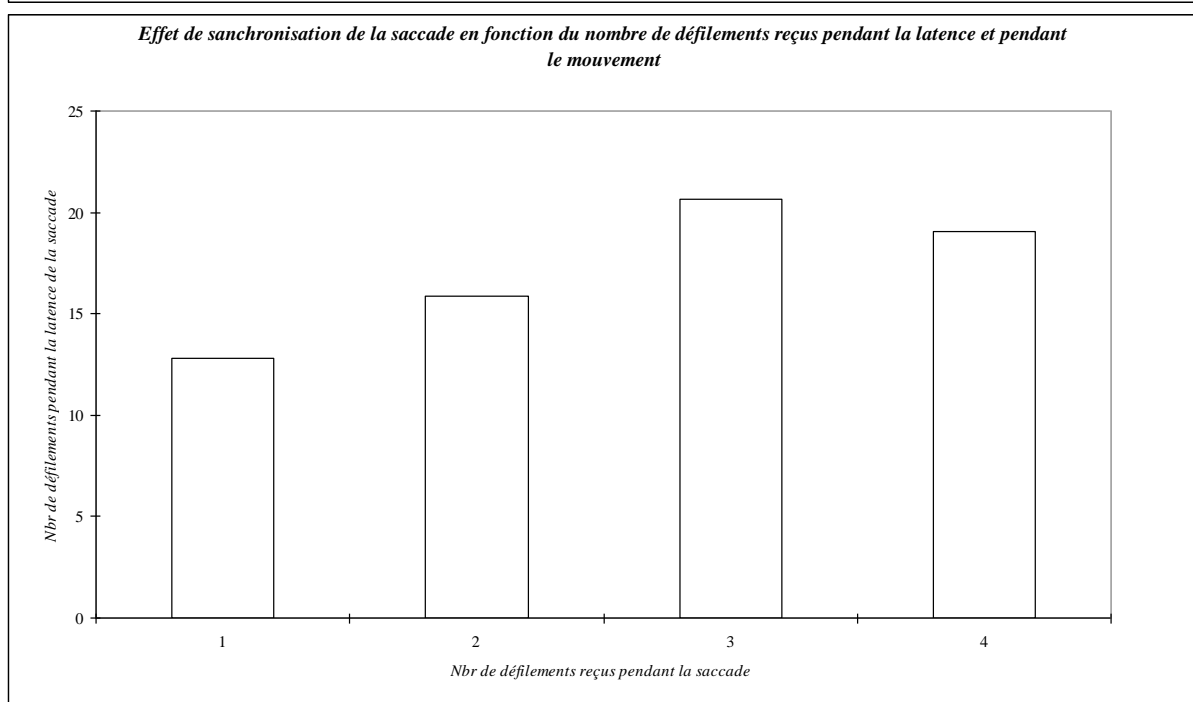
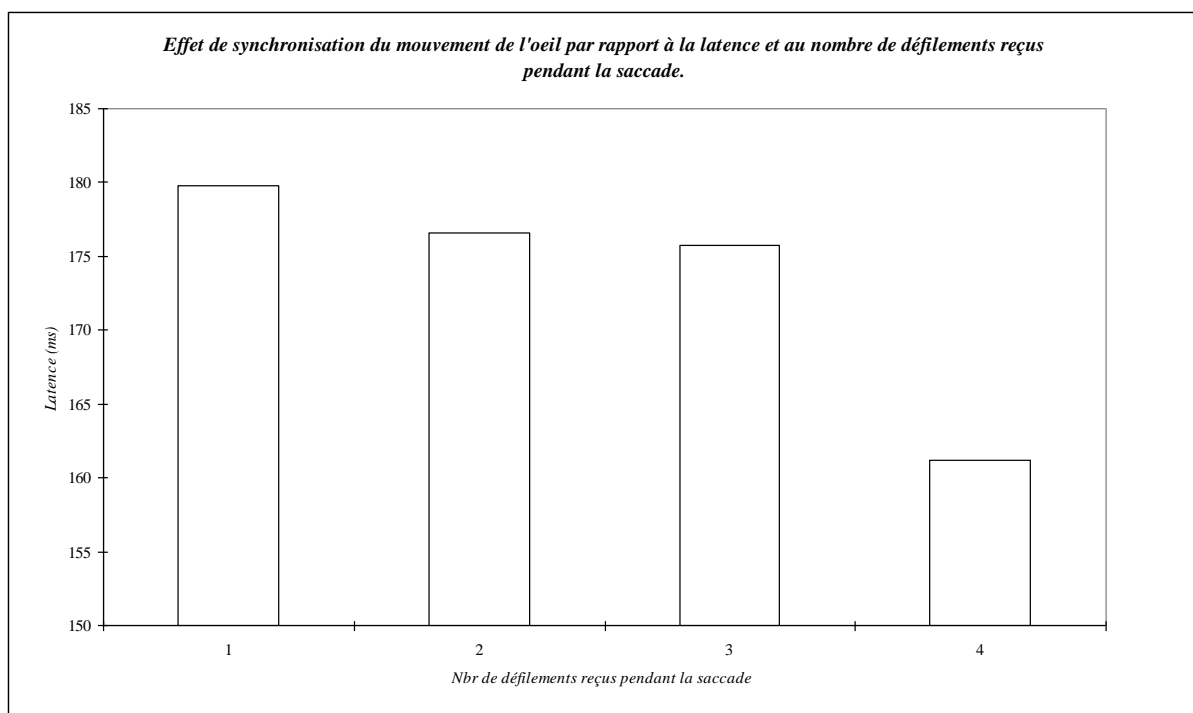


Effet sur la durée de la saccade du nombre de défilements reçus pendant le mouvement.

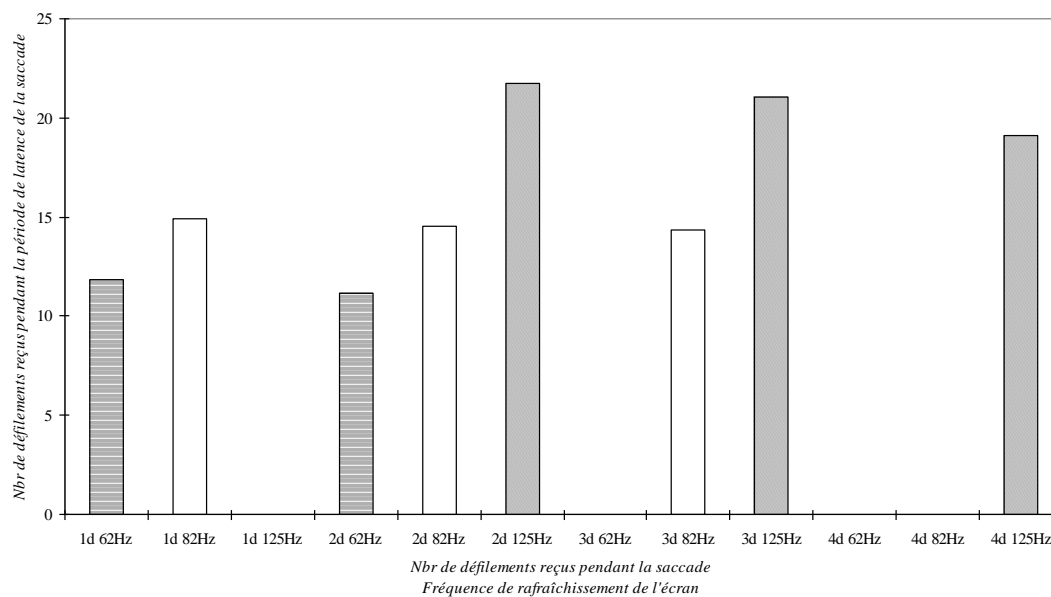


Effet de synchronisation de la saccade par rapport au nombre de défilements reçus durant la saccade et à la fréquence de rafraîchissement de l'écran utilisée, sur la durée de la saccade.

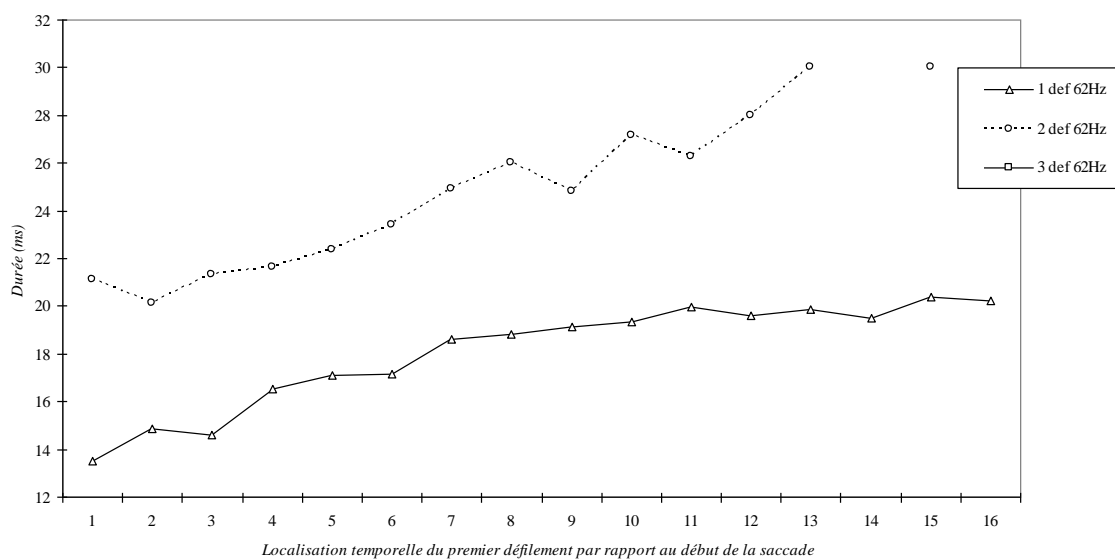




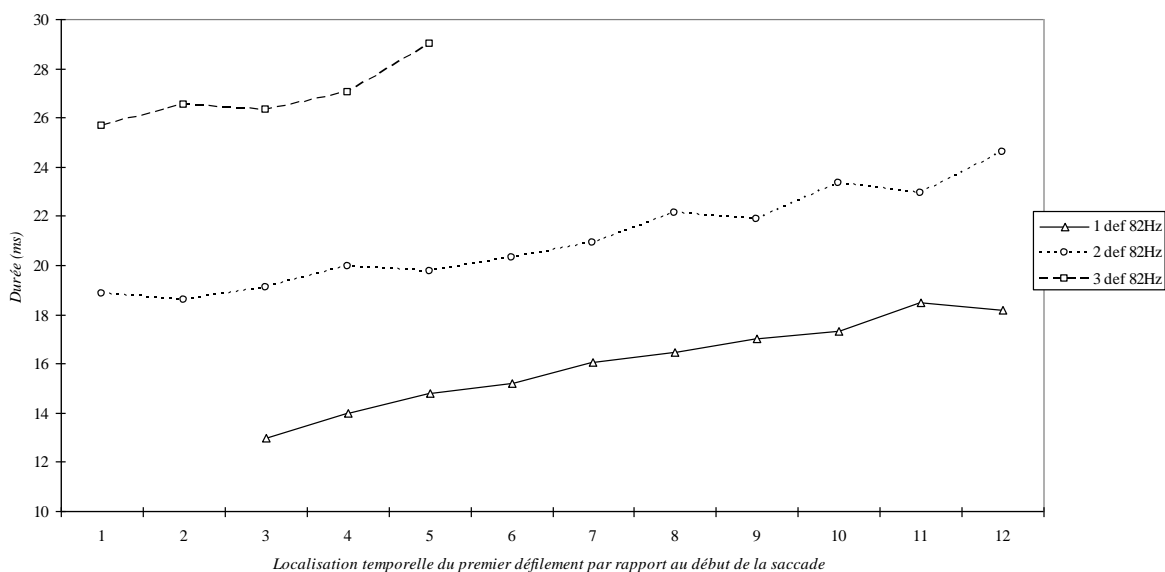
Effet de synchronisation de la saccade par rapport au nombre de défilements reçus durant la période de latence, au nombre de défilements reçus durant la saccade, et à la fréquence de rafraîchissement de l'écran utilisée.



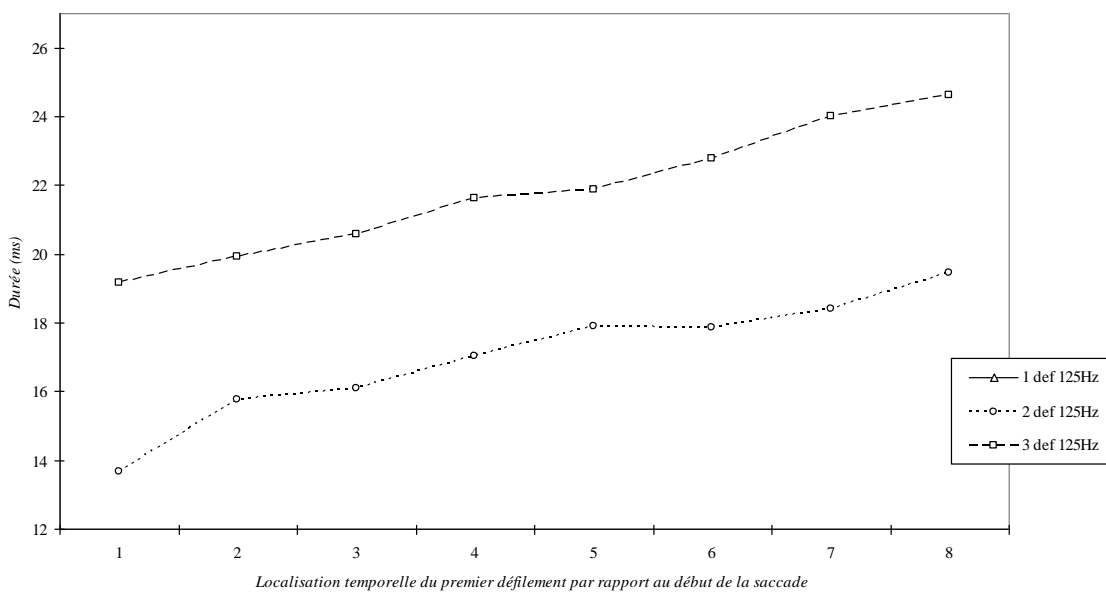
Effet sur la durée de la saccade de la position temporelle des défilements par rapport au début du mouvement, et du nombre reçu, pour une fréquence de rafraîchissement de l'écran de 62 Hz.



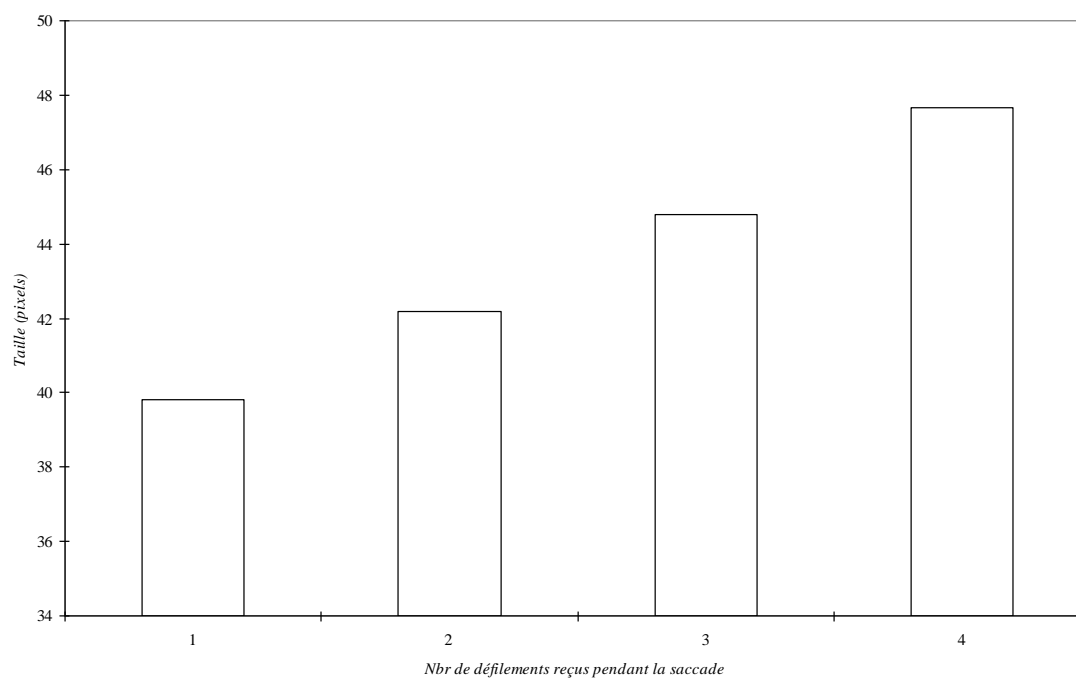
Effet sur la durée de la saccade de la position temporelle des défilements par rapport au début du mouvement, et du nombre reçu, pour une fréquence de rafraîchissement de l'écran de 82 Hz.



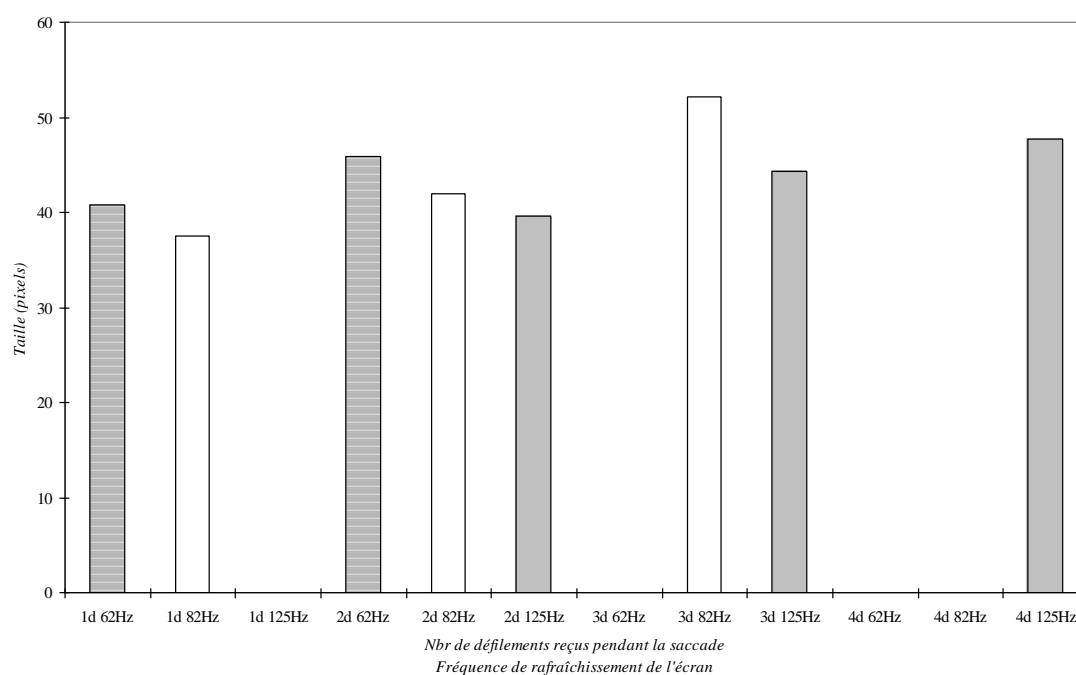
Effet sur la durée de la saccade de la position temporelle des défilements par rapport au début du mouvement, et du nombre reçu, pour une fréquence de rafraîchissement de l'écran de 125 Hz.



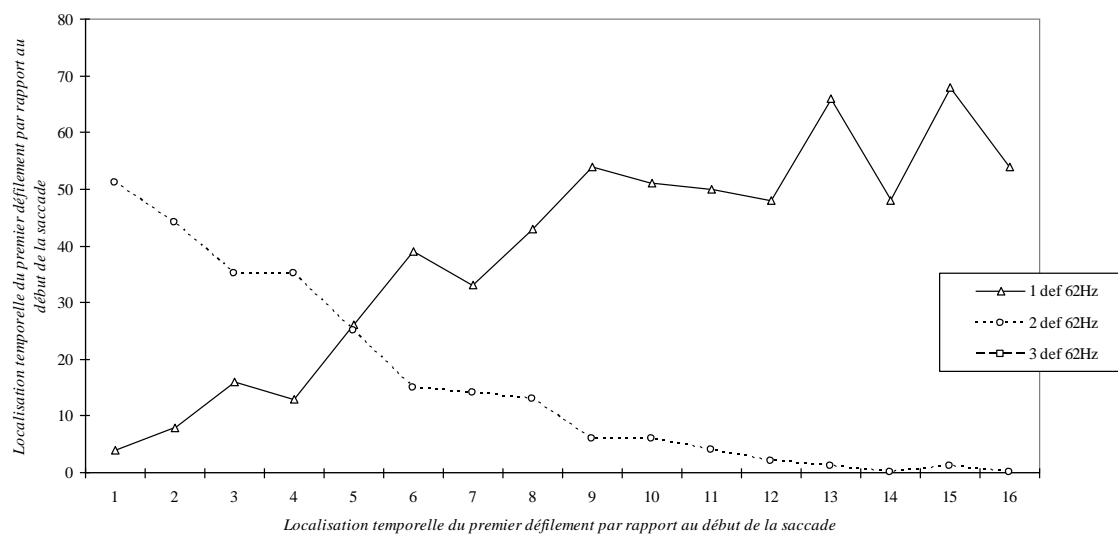
Effet sur la taille des saccades du nombre de défilements reçus pendant le mouvement.



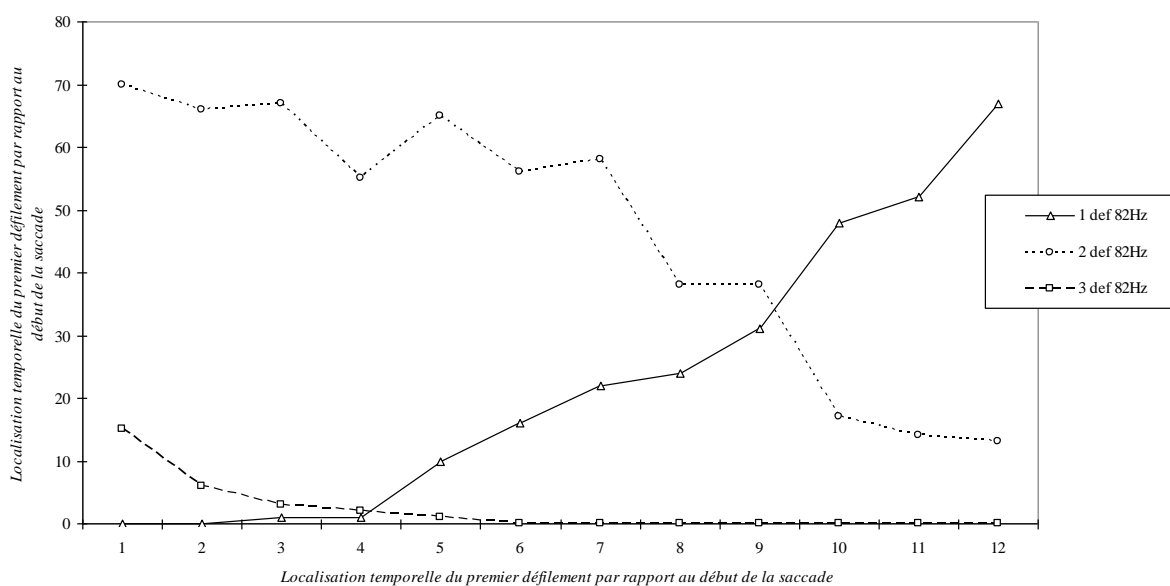
Effet de synchronisation de la saccade par rapport au nombre de défilements reçus durant la saccade et à la fréquence de rafraîchissement de l'écran utilisée, sur la taille de la saccade.



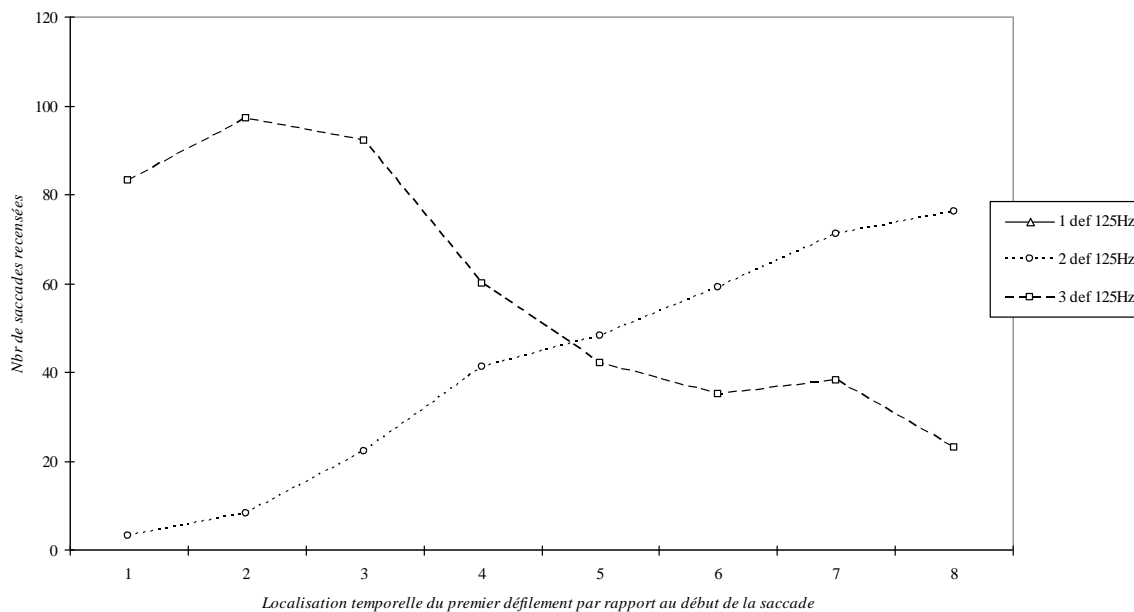
Effet sur la répartition du nombre de saccades de la position temporelle des défilements par rapport au début du mouvement, et du nombre reçu, pour une fréquence de rafraîchissement de l'écran de 62 Hz.



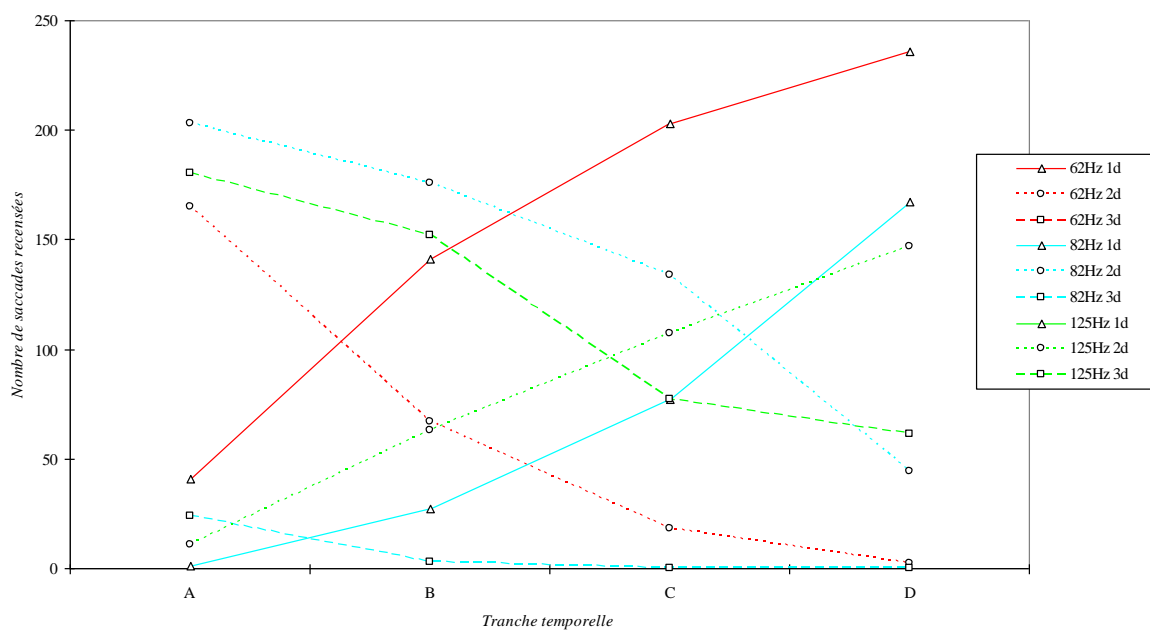
Effet sur la répartition du nombre de saccades de la position temporelle des défilements par rapport au début du mouvement, et du nombre reçu, pour une fréquence de rafraîchissement de l'écran de 82 Hz.



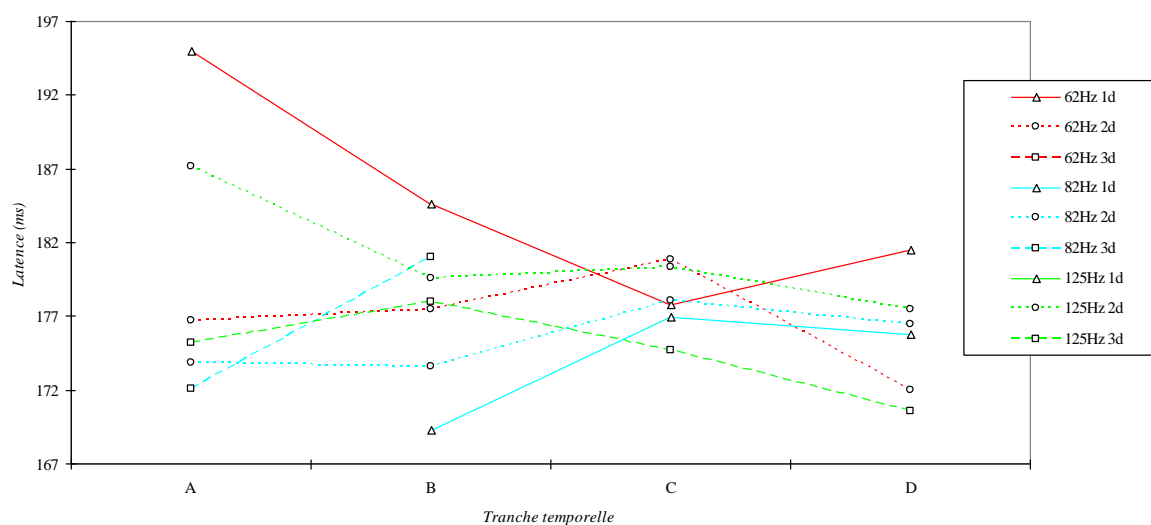
Effet sur la répartition du nombre de saccades de la position temporelle des défilements par rapport au début du mouvement, et du nombre reçu, pour une fréquence de rafraîchissement de l'écran de 125 Hz.



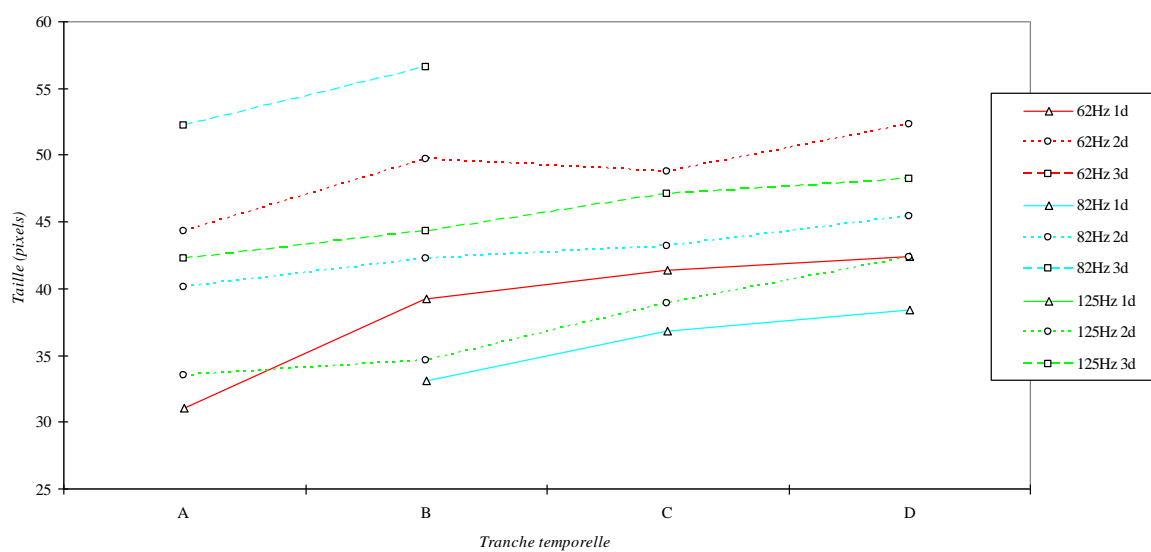
Effet du nombre de rafraîchissements reçus par l'oeil pendant la saccade, en fonction de leur localisation temporelle par rapport au début du mouvement et de la fréquence de balayage de l'écran sur la répartition du nombre de la saccades



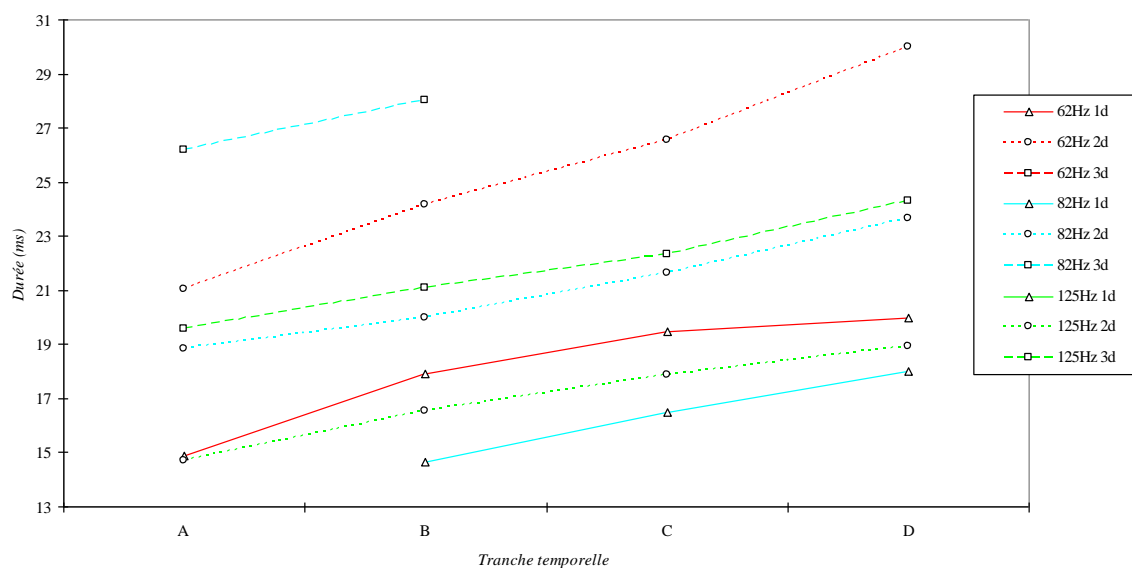
Effet du nombre de rafraîchissements reçus par l'oeil pendant la saccade, en fonction de leur localisation temporelle par rapport au début du mouvement et de la fréquence de balayage de l'écran sur la latence de la saccade



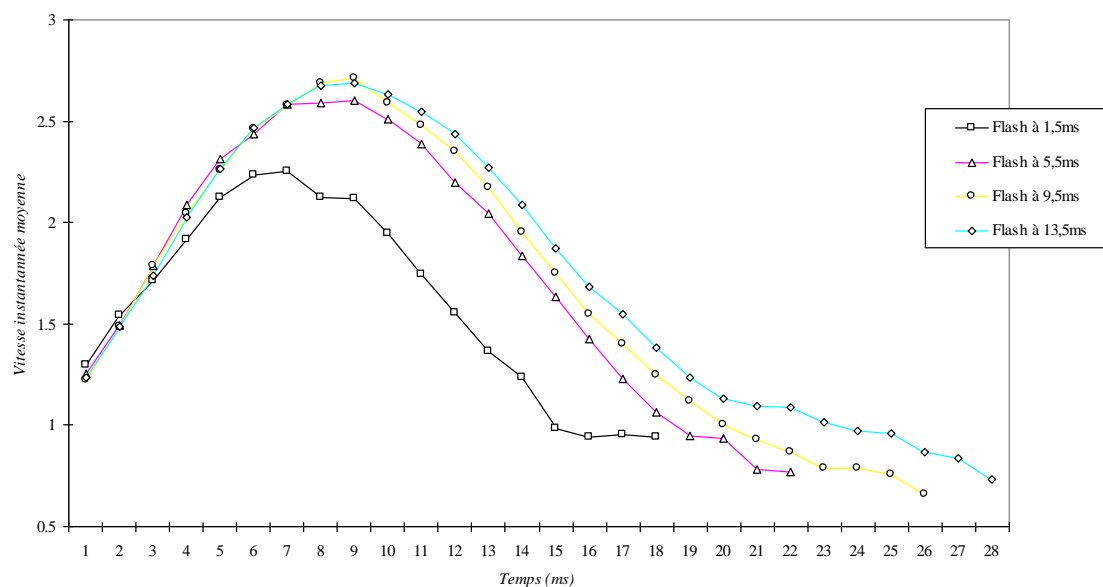
Effet du nombre de rafraîchissements reçus par l'oeil pendant la saccade, en fonction de leur localisation temporelle par rapport au début du mouvement et de la fréquence de balayage de l'écran sur la taille de la saccade



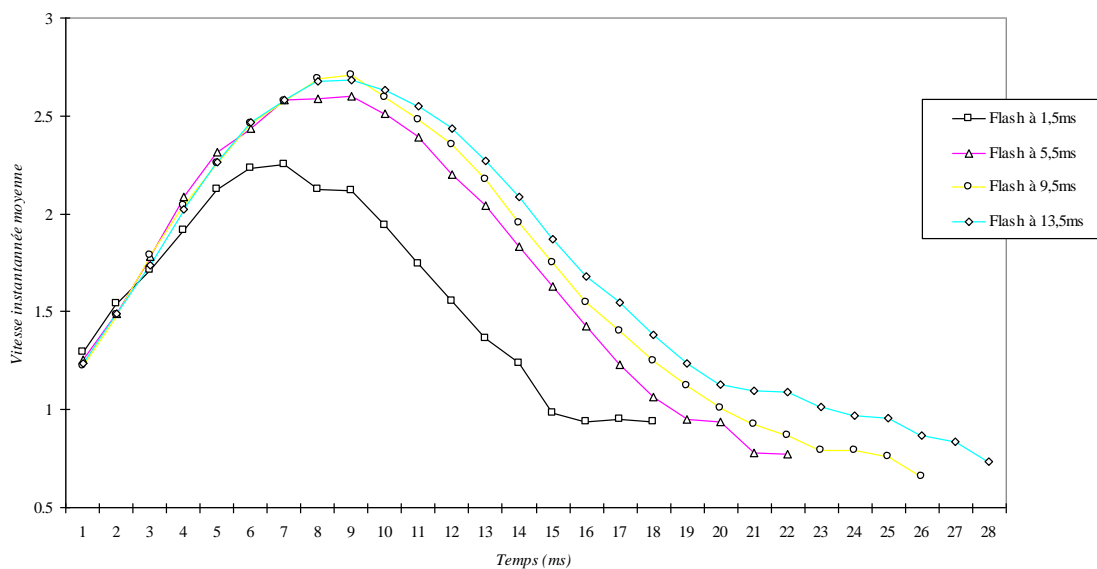
Effet du nombre de rafraîchissements reçus par l'œil pendant la saccade, en fonction de leur localisation temporelle par rapport au début du mouvement et de la fréquence de balayage de l'écran, sur la durée de la saccade



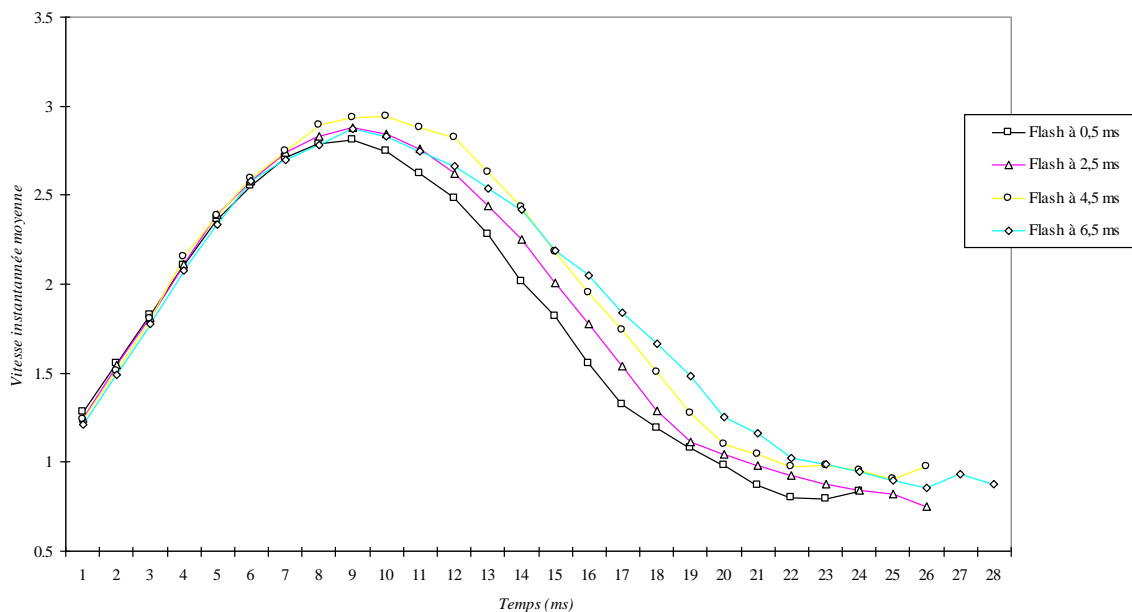
Effet de la position moyenne du balayage par rapport au début du mouvement de l'œil, sur la vitesse instantanée et la durée des saccades recevant 1 défilement à 62 Hz.



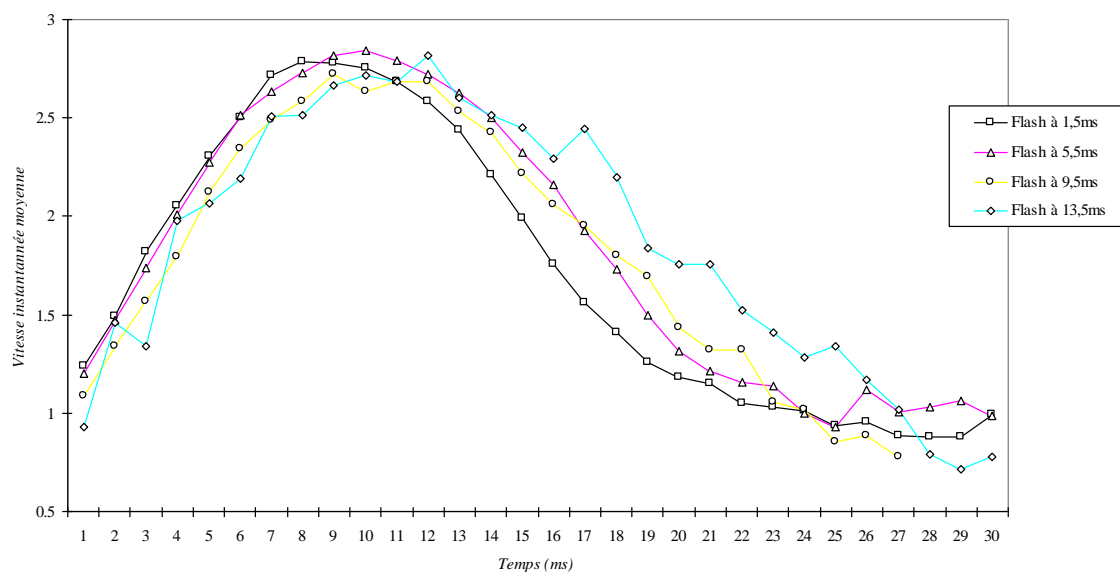
Effet de la position moyenne du balayage par rapport au début du mouvement de l'oeil, sur la vitesse instantanée et la durée des saccades recevant 1 défilements à 62 Hz.



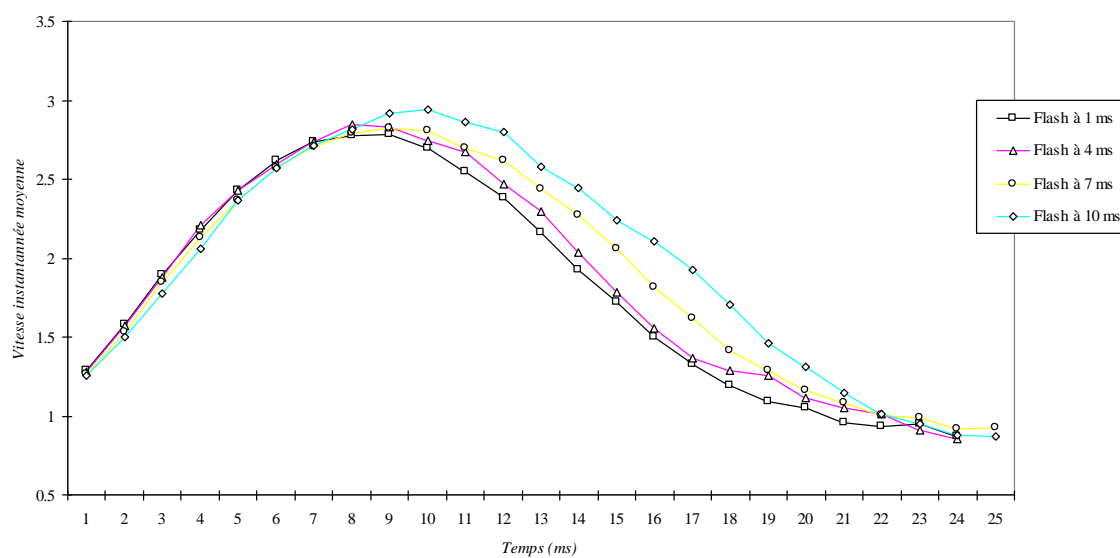
Effet de la position moyenne du balayage par rapport au début du mouvement de l'oeil, sur la vitesse instantanée et la durée des saccades recevant 3 défilements à 125 Hz.

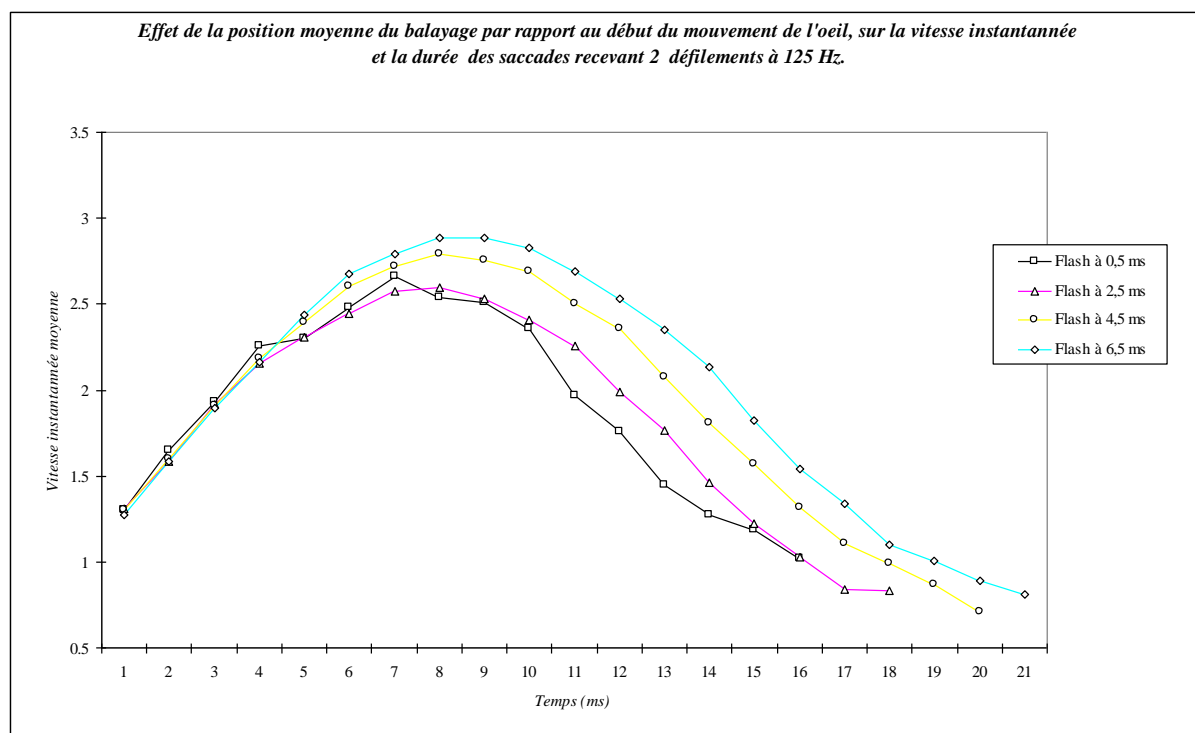


Effet de la position moyenne du balayage par rapport au début du mouvement de l'oeil, sur la vitesse instantanée et la durée des saccades recevant 2 défilements à 62 Hz.

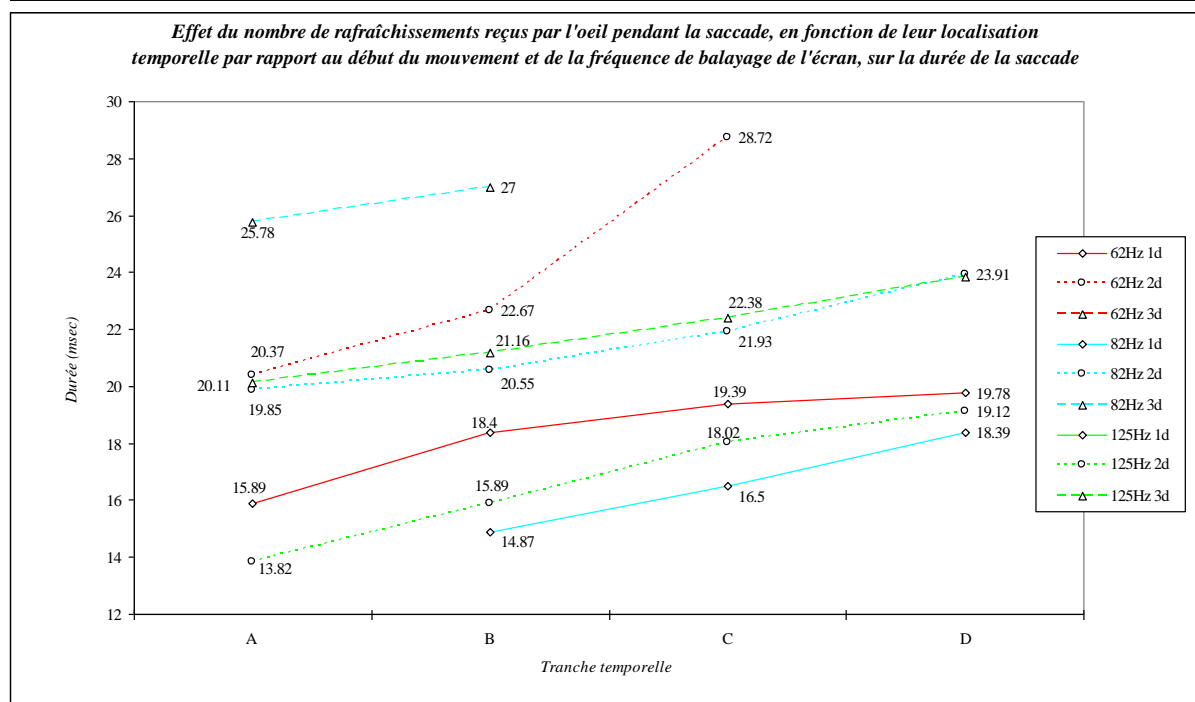
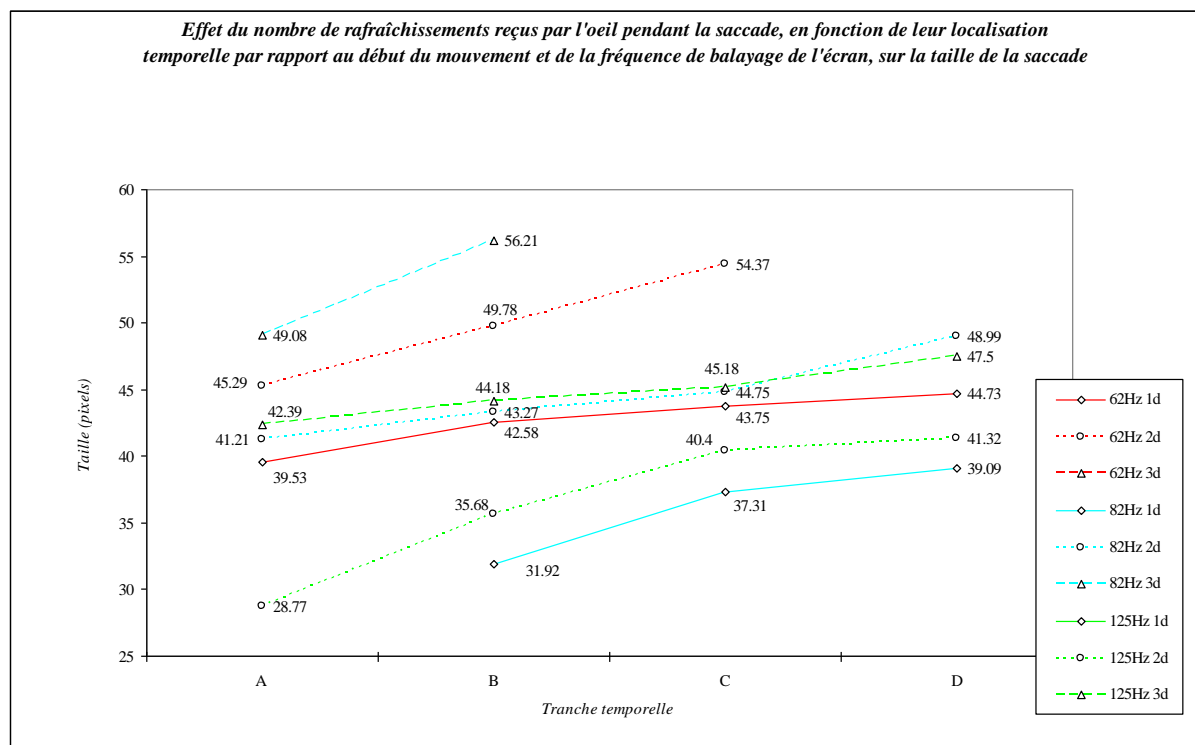


Effet de la position moyenne du balayage par rapport au début du mouvement de l'oeil, sur la vitesse instantanée et la durée des saccades recevant 2 défilements à 82 Hz.

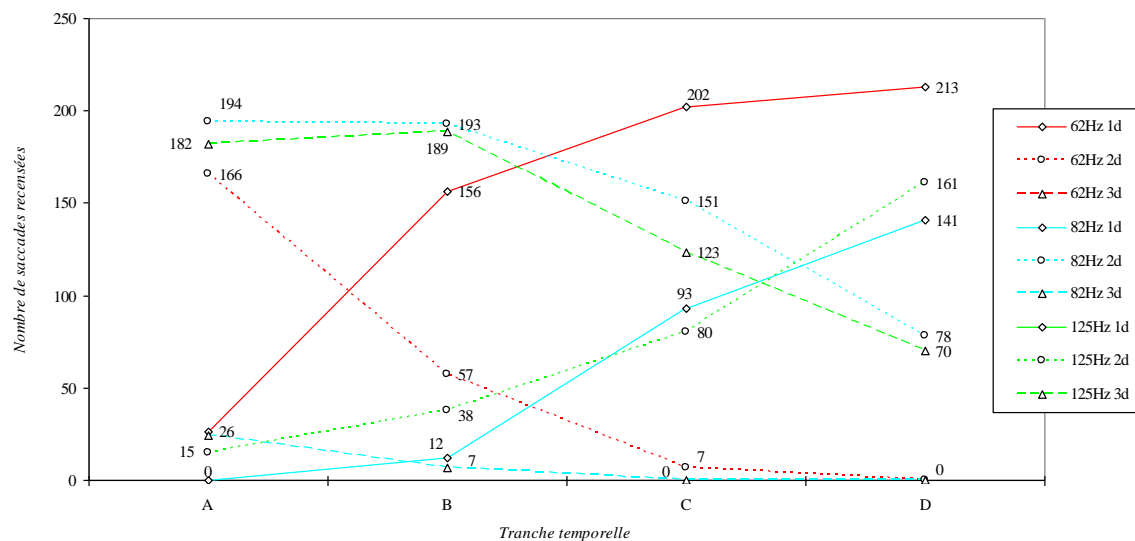




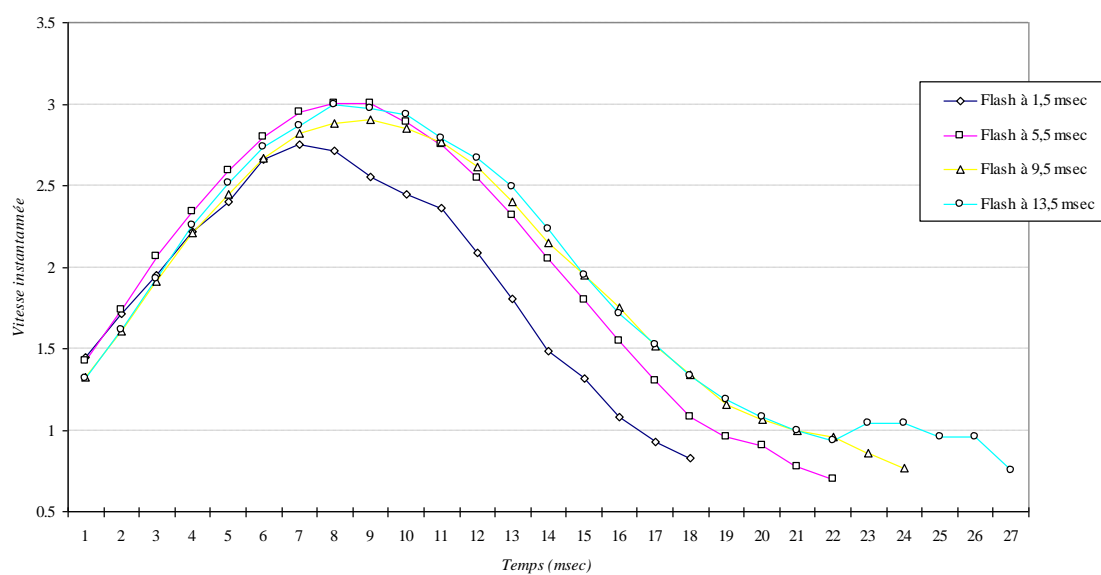
POLARITÉ POSITIVE



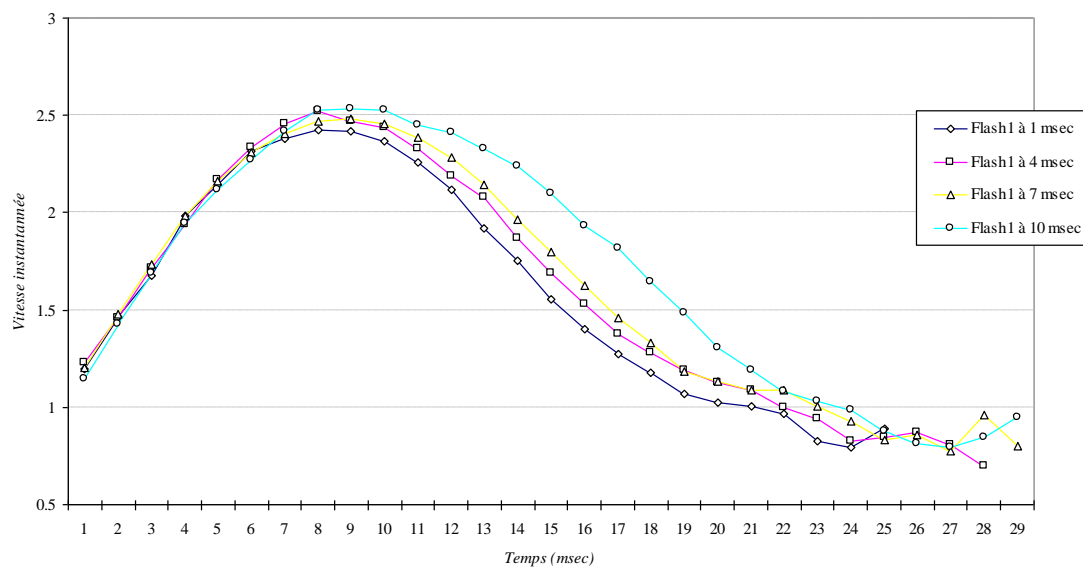
Effet du nombre de rafraîchissements reçus par l'œil pendant la saccade, en fonction de leur localisation temporelle par rapport au début du mouvement et de la fréquence de balayage de l'écran, sur la répartition du nombre de saccades



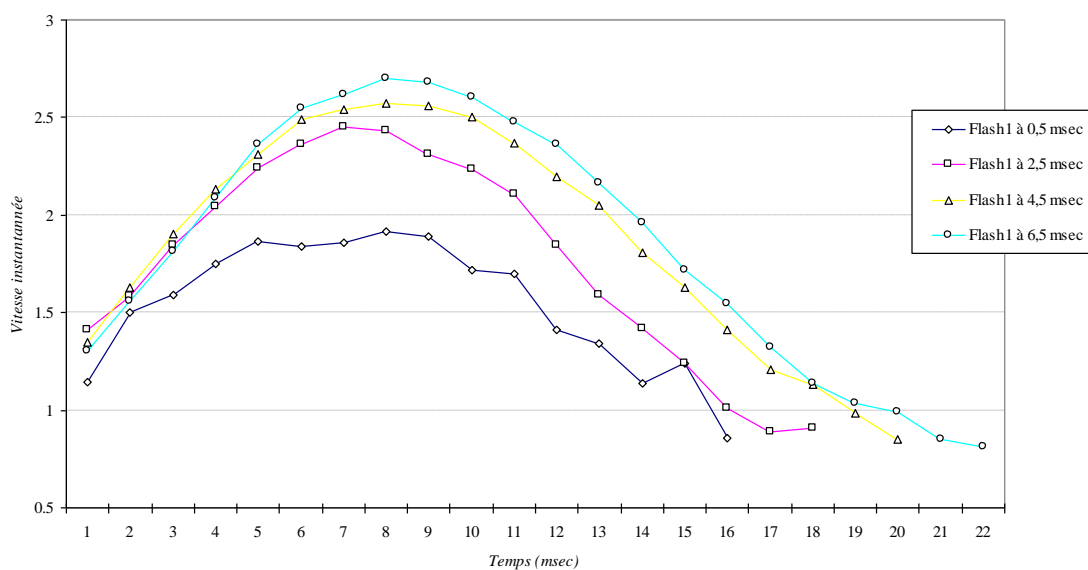
Effet de la position moyenne du balayage par rapport au début du mouvement de l'œil, sur la vitesse instantanée et la durée de saccades recevant 1 défilement à 62 Hz



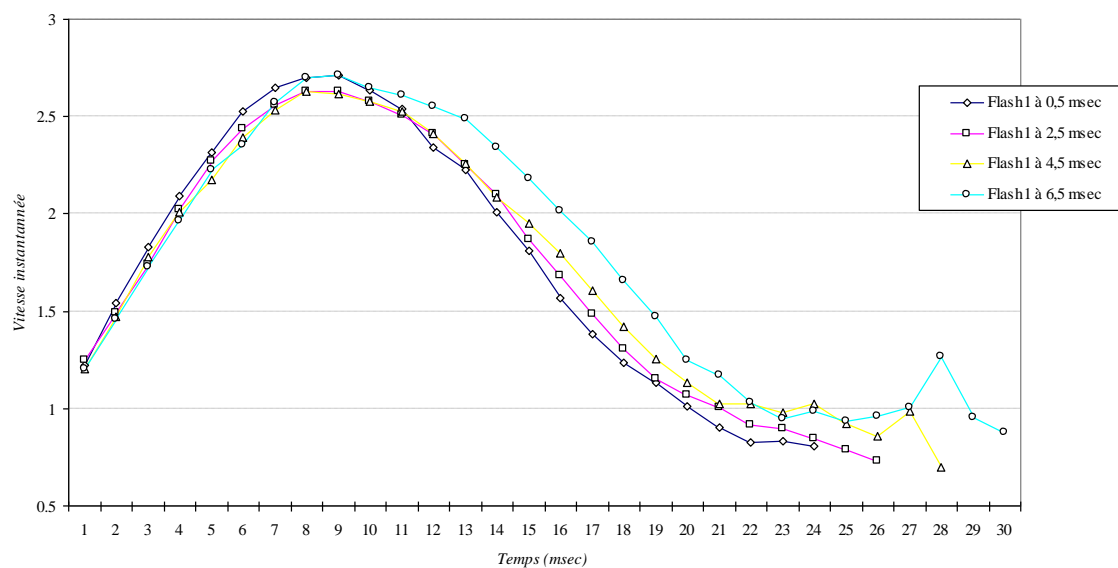
Effet de la position moyenne du balayage par rapport au début du mouvement de l'oeil, sur la vitesse instantanée et la durée de saccades recevant 2 défilements à 82 Hz



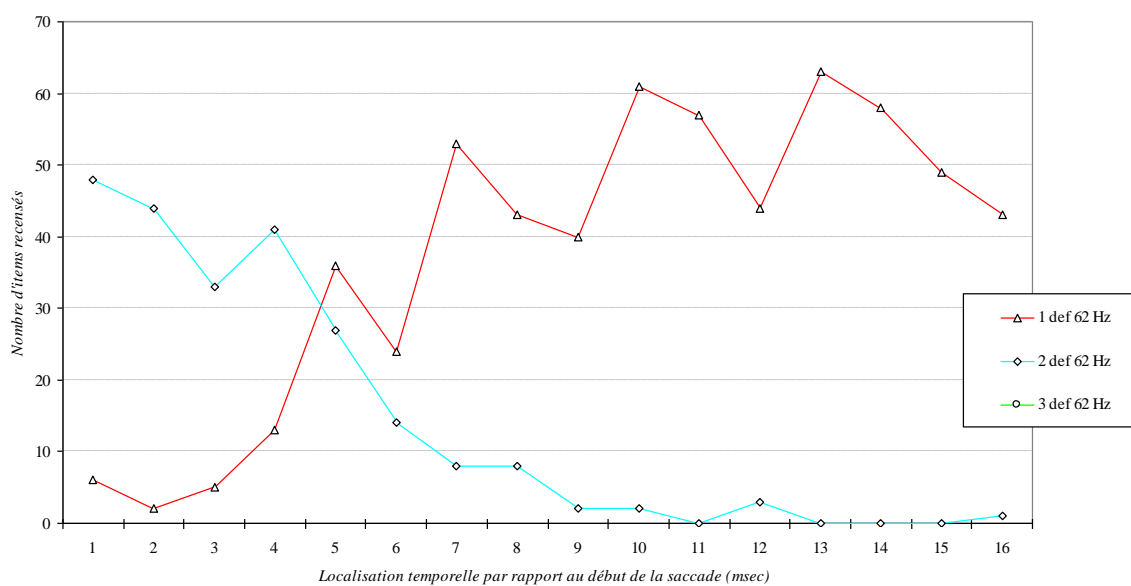
Effet de la position moyenne du balayage par rapport au début du mouvement de l'oeil, sur la vitesse instantanée et la durée de saccades recevant 2 défilements à 125 Hz

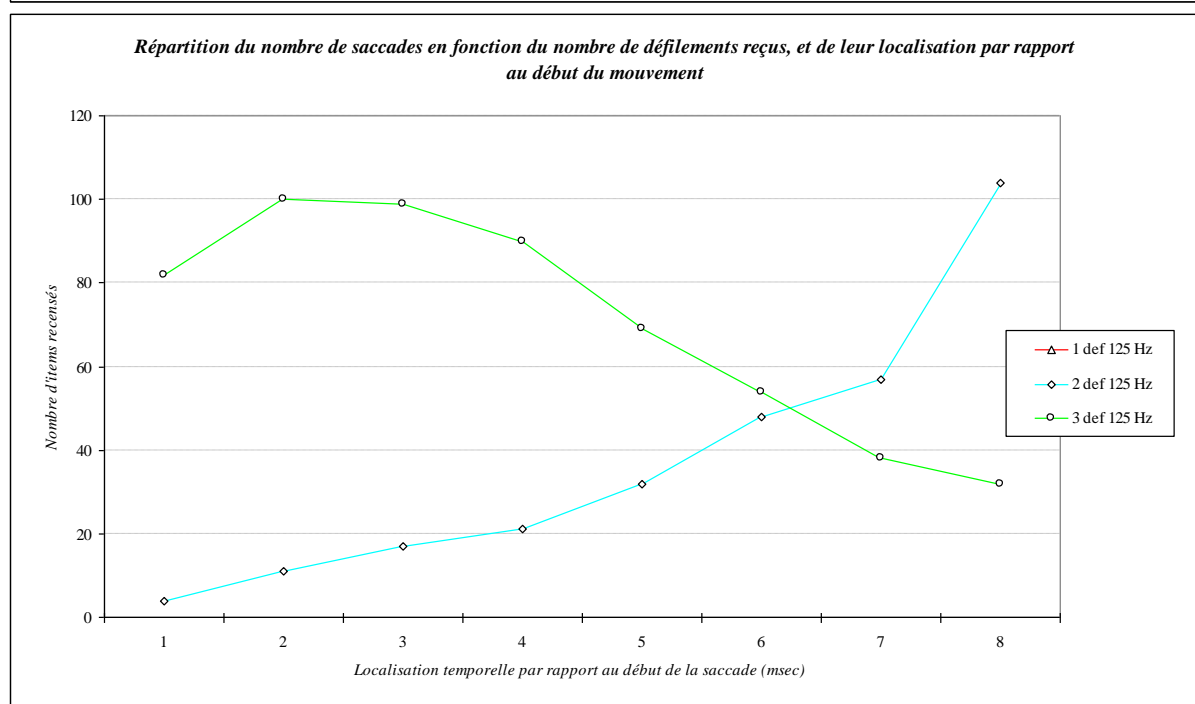
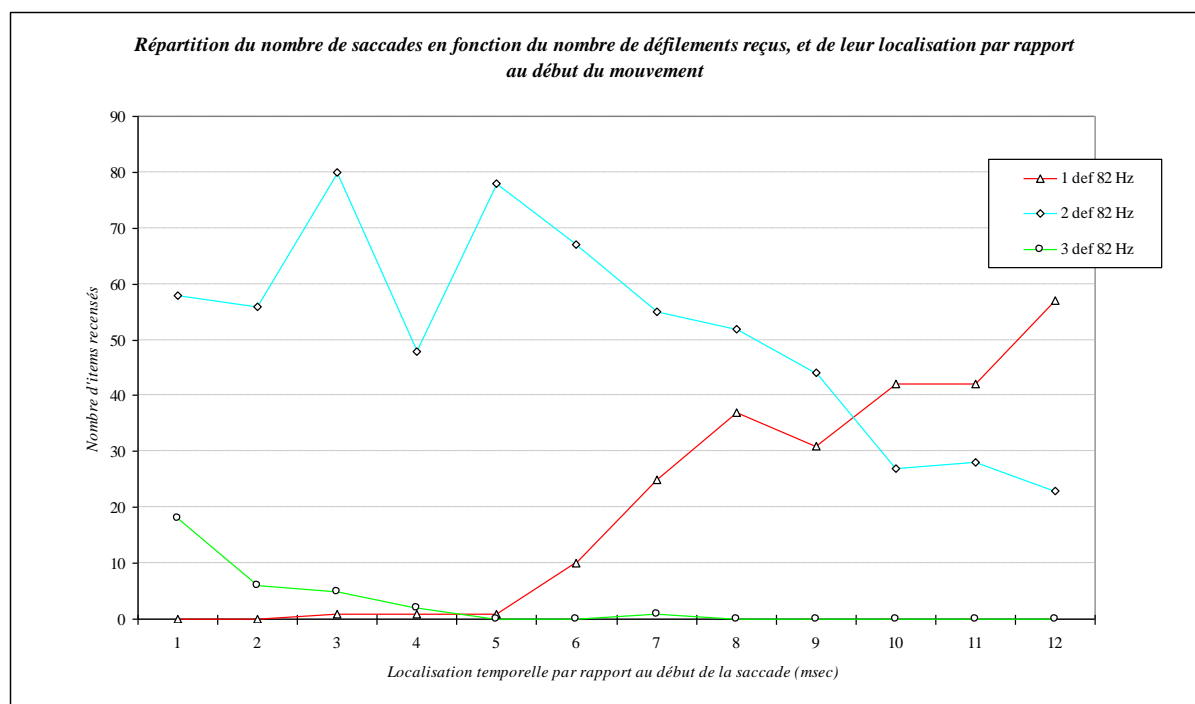


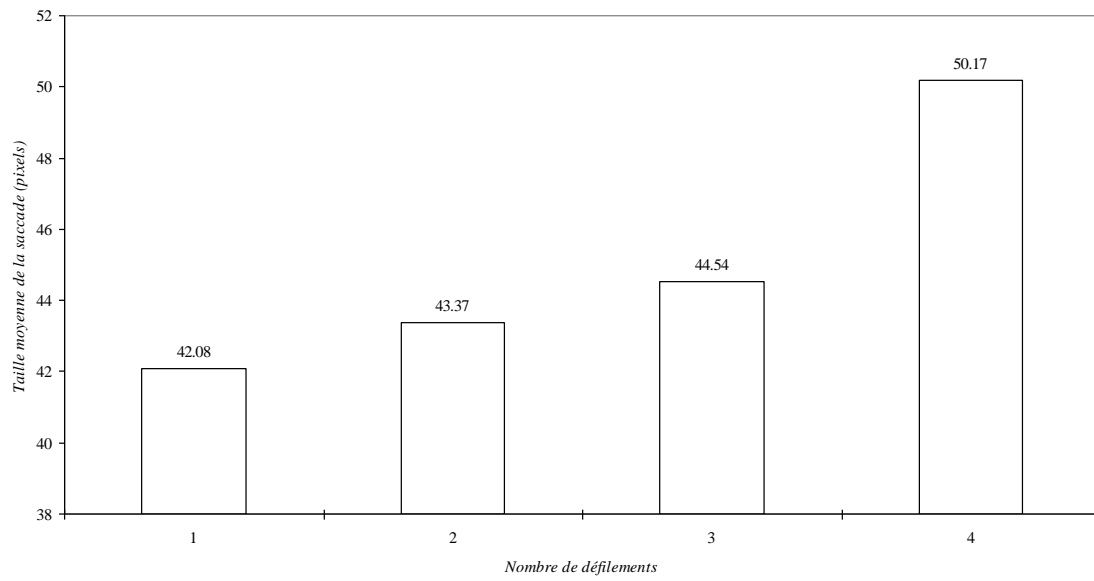
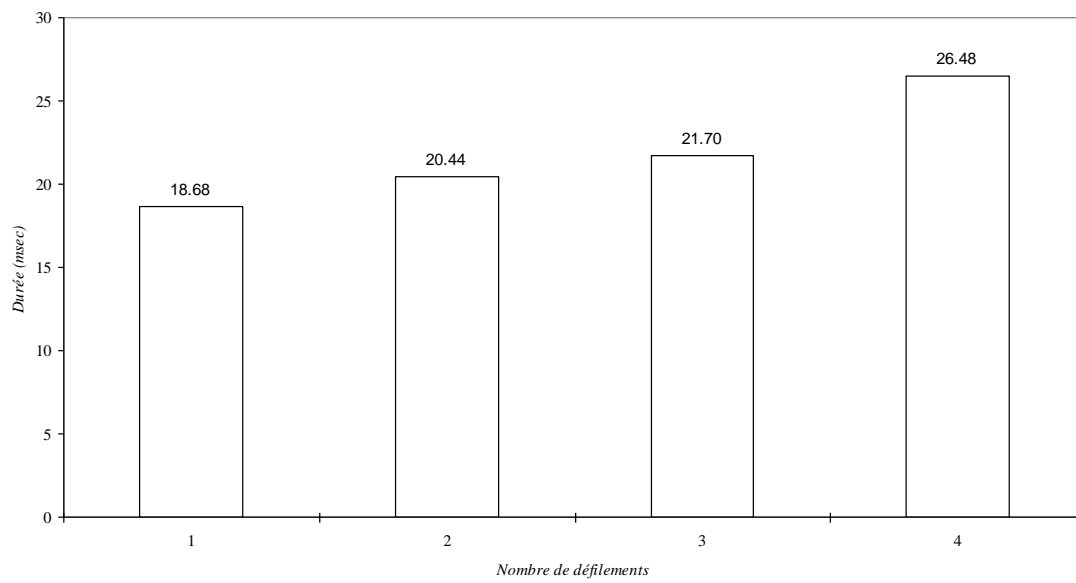
Effet de la position moyenne du balayage par rapport au début du mouvement de l'oeil sur la vitesse instantanée et la durée de saccades recevant 3 défilements à 125 Hz

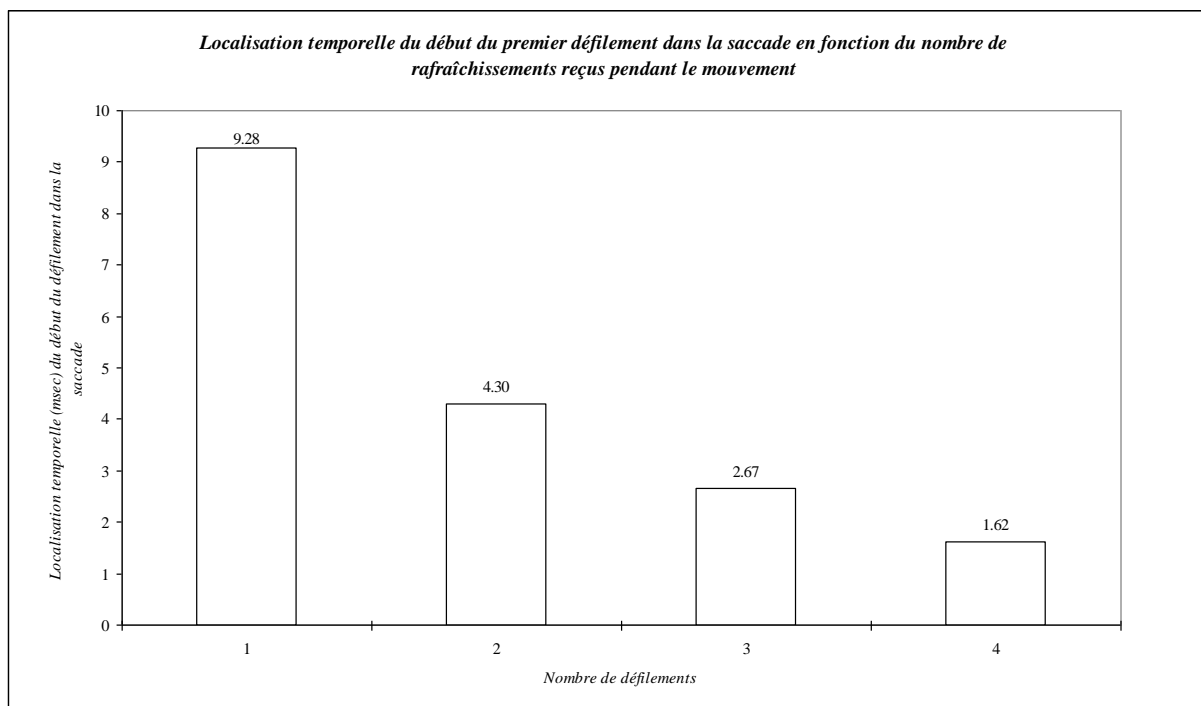
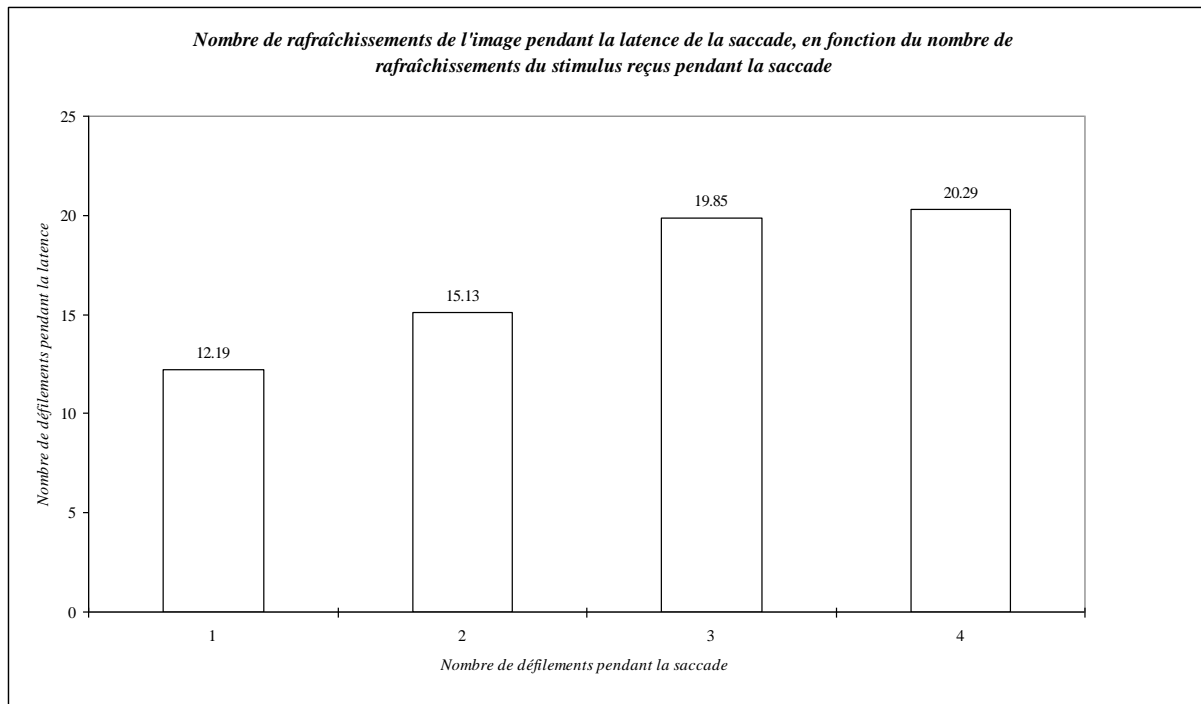


Répartition du nombre de saccades en fonction du nombre de défilements reçus, et de leur localisation par rapport au début du mouvement

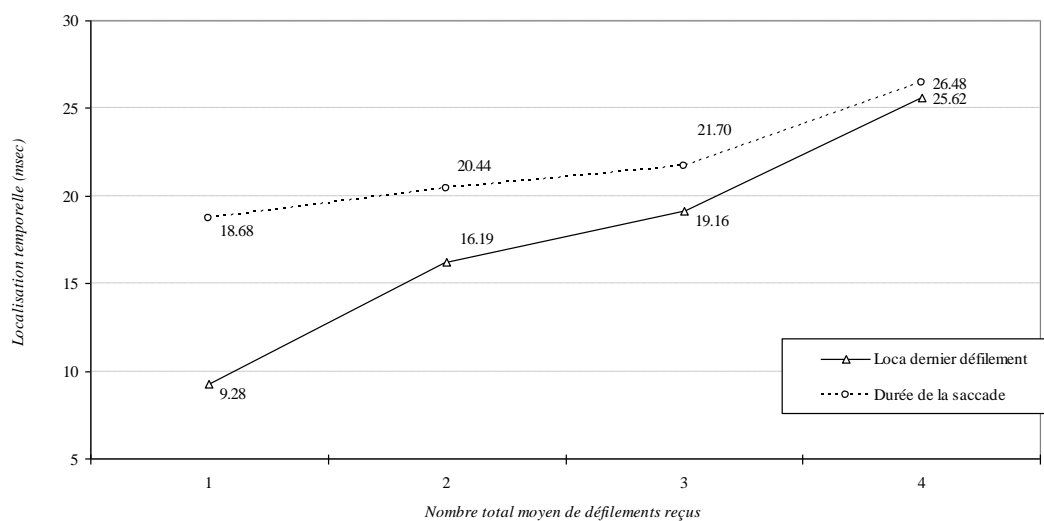




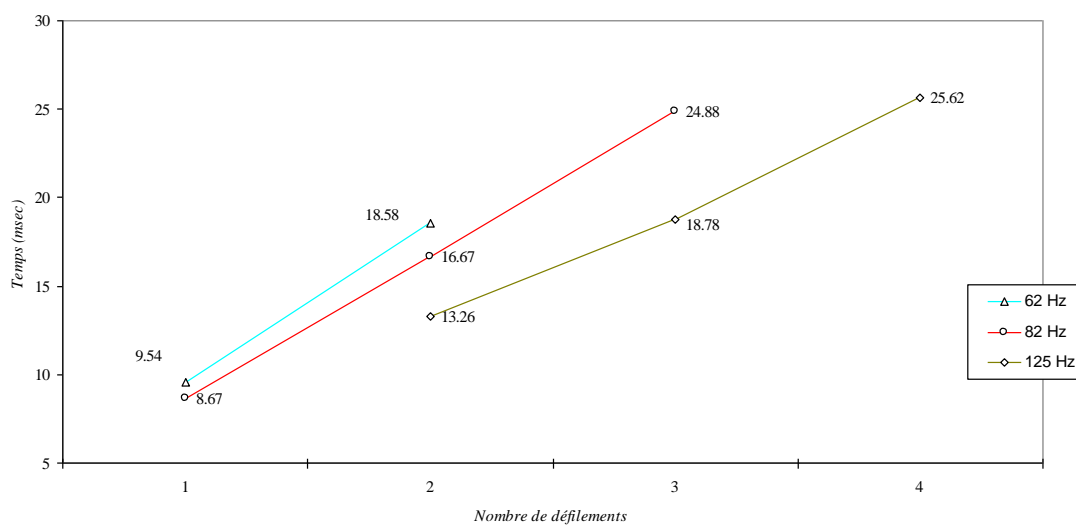
Taille moyenne de la saccade en fonction du nombre de rafraîchissements durant le mouvement*Durée de la saccade en fonction du nombre de rafraîchissements reçus*



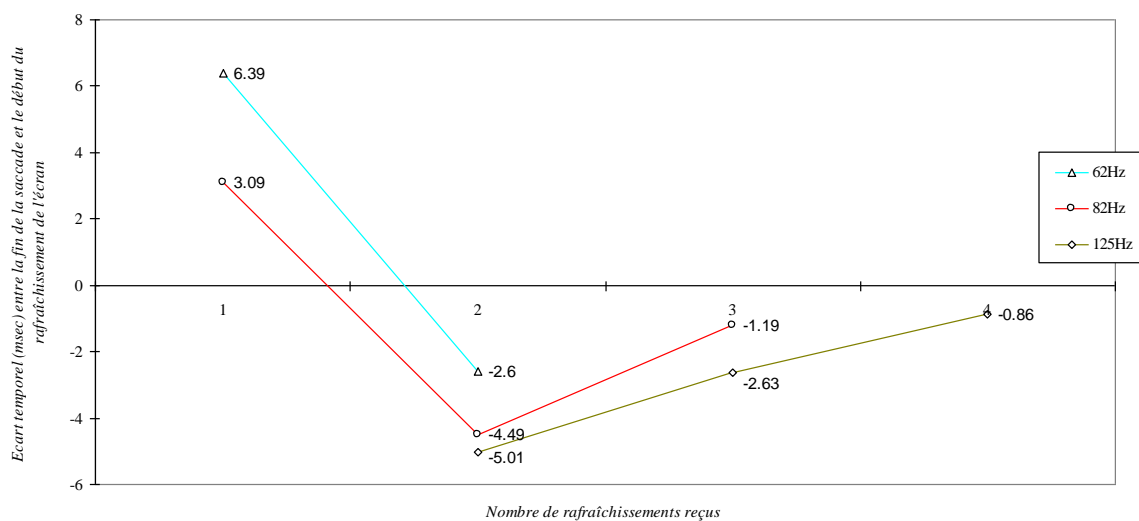
Localisation temporelle moyenne du dernier rafraîchissement reçu pendant la saccade en fonction du nombre total de défilements, par rapport à la durée totale moyenne des saccades dans chaque catégorie



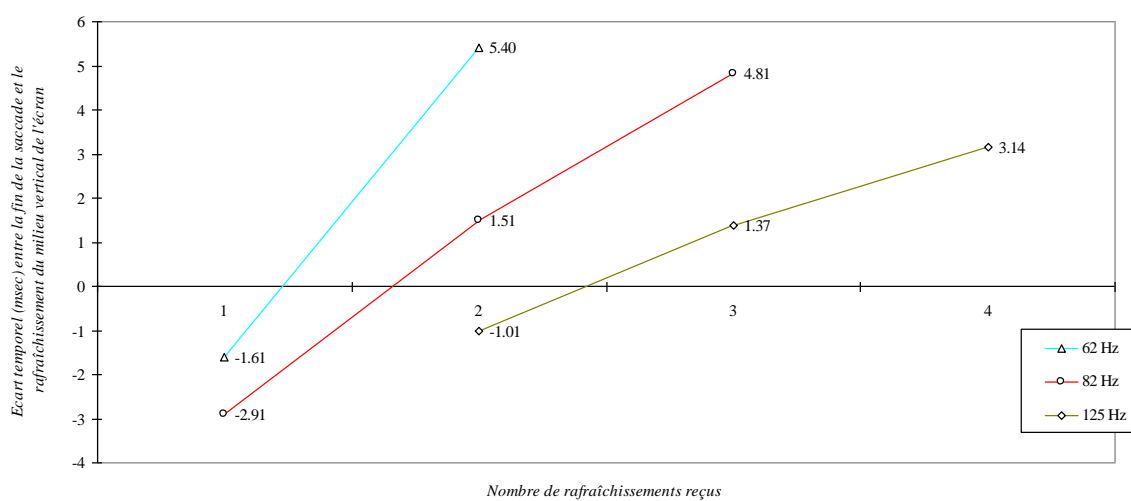
Localisation temporelle dans la saccade du dernier défilement reçu, en fonction de la fréquence de rafraîchissement de l'écran utilisée, et du nombre total de défilements reçus durant le mouvement



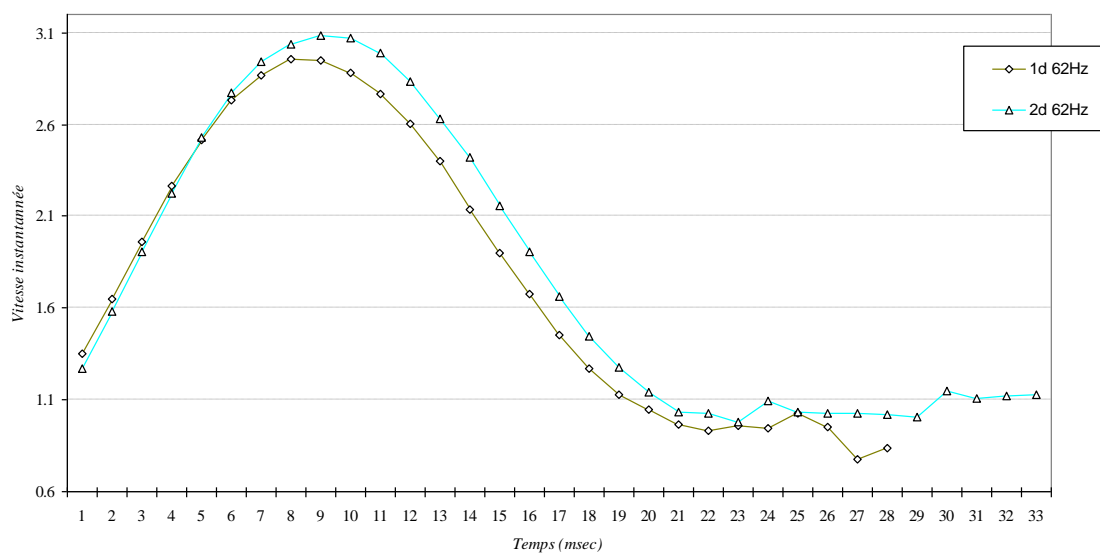
Effet de synchronisation de la fin de la saccade avec le début du rafraîchissement de l'écran, en fonction de la fréquence et du nombre de rafraîchissements reçus durant le mouvement



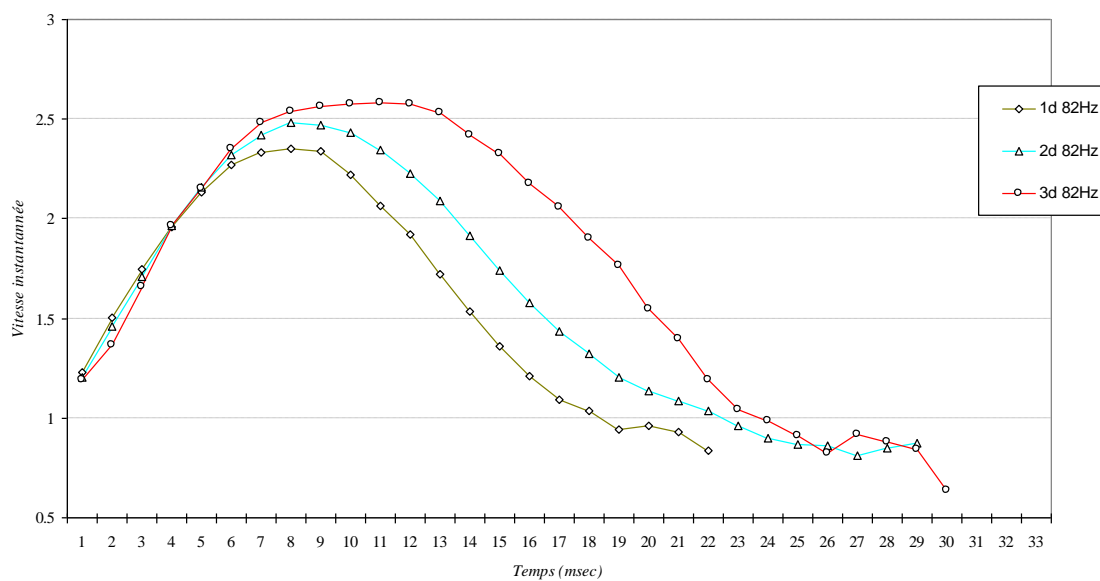
Effet de synchronisation de la fin de la saccade avec le passage du faisceau d'électrons au niveau du stimulus affiché, en fonction de la fréquence et du nombre de rafraîchissements reçus durant le mouvement



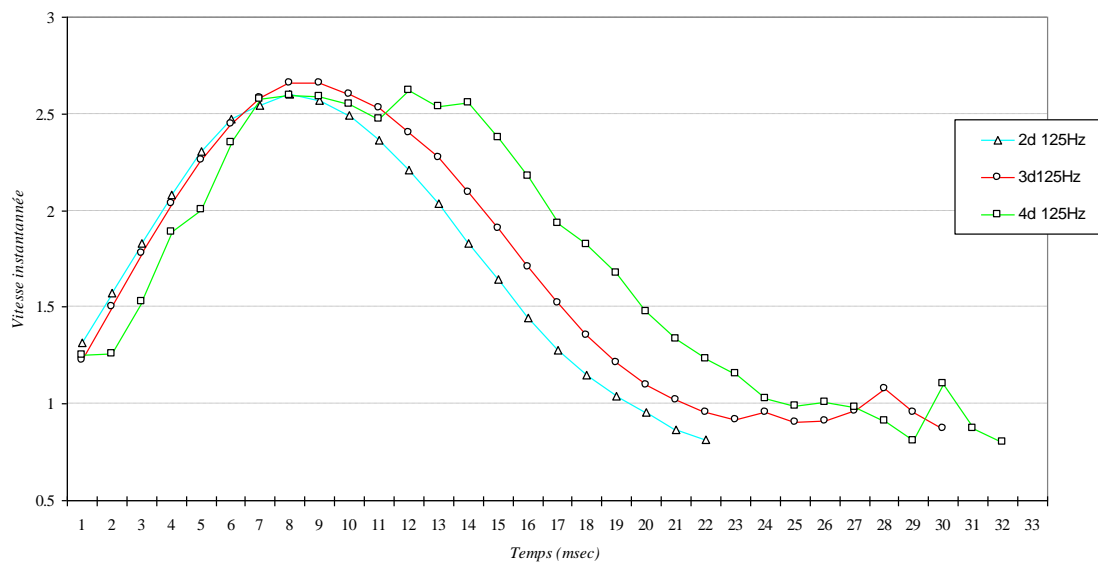
Courbes des vitesses instantanées moyennes des saccades à 62 Hz, en fonction du nombre de rafraîchissements reçus (1 ou 2)



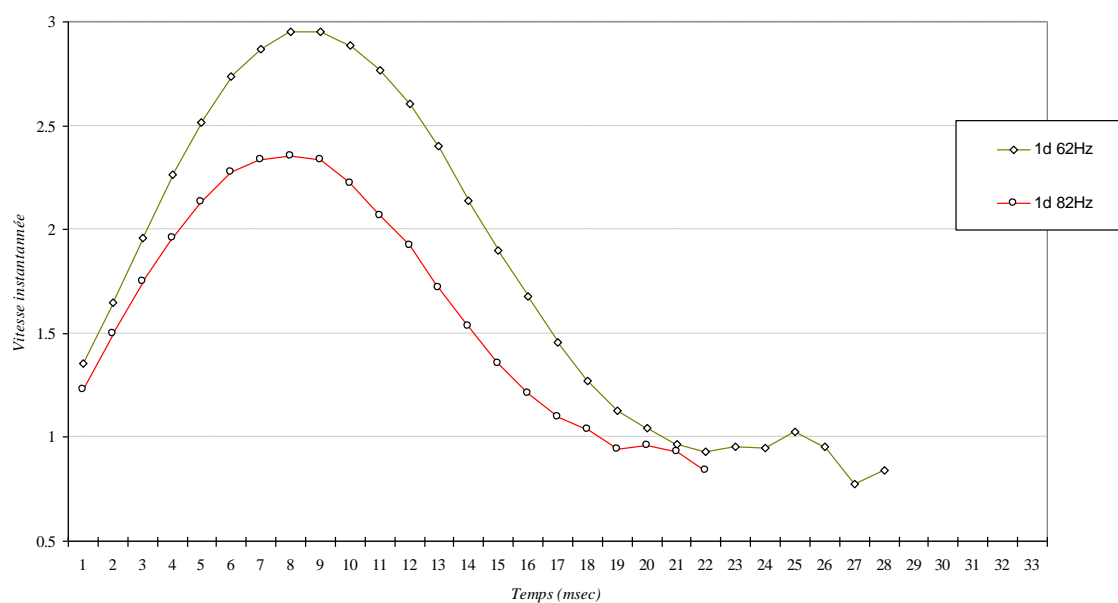
Courbes des vitesses instantanées moyennes des saccades à 82 Hz, en fonction du nombre de rafraîchissements reçus (1,2 ou 3)



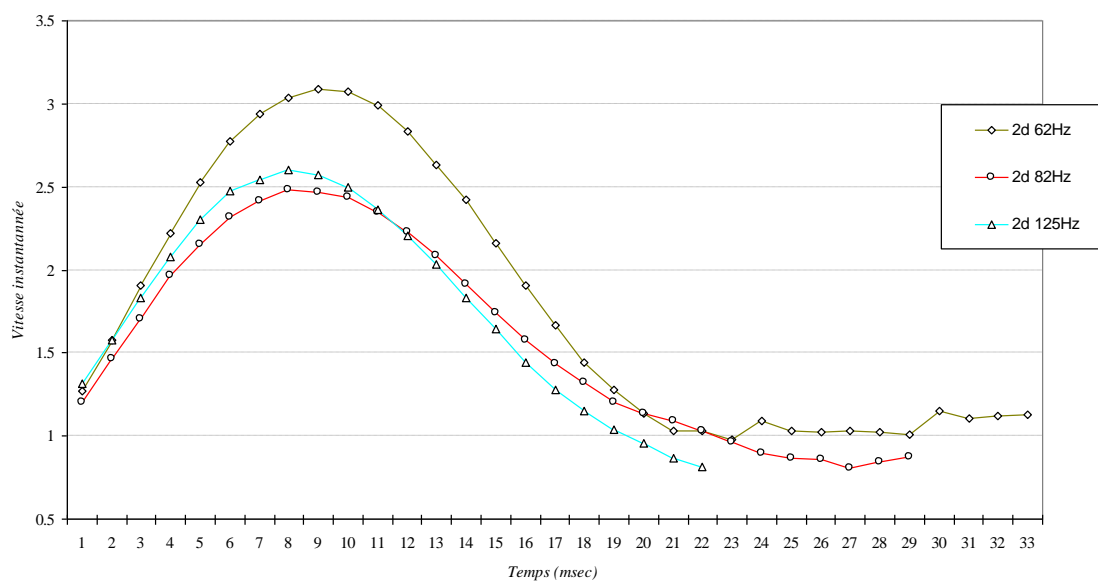
Courbes des vitesses instantannées moyennes des saccades à 125Hz, en fonction du nombre de rafraîchissements reçus (2,3 ou 4)



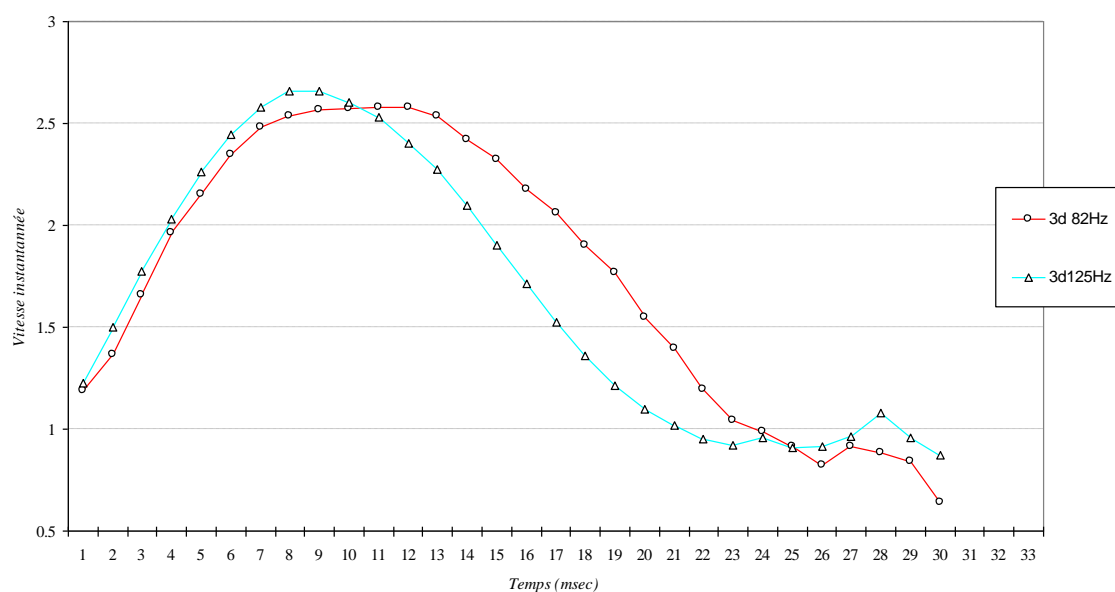
Courbes des vitesses instantannées moyennes pour les saccades recevant 1 rafraîchissement, à 62 et 82 Hz



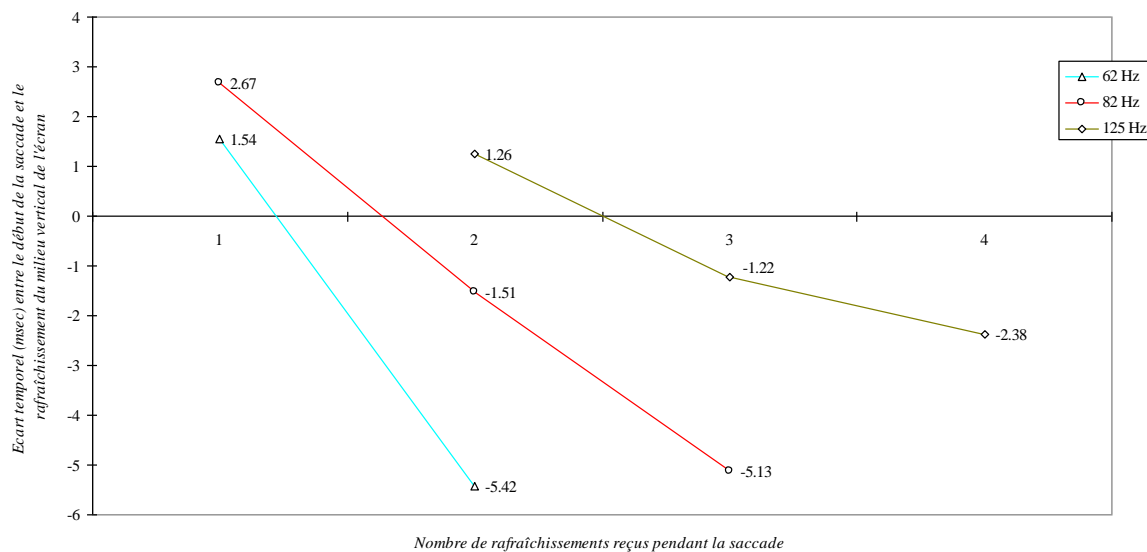
Courbes des vitesses instantannées moyennes pour les saccades recevant 2 rafraîchissements, à 62, 82 et 125 Hz



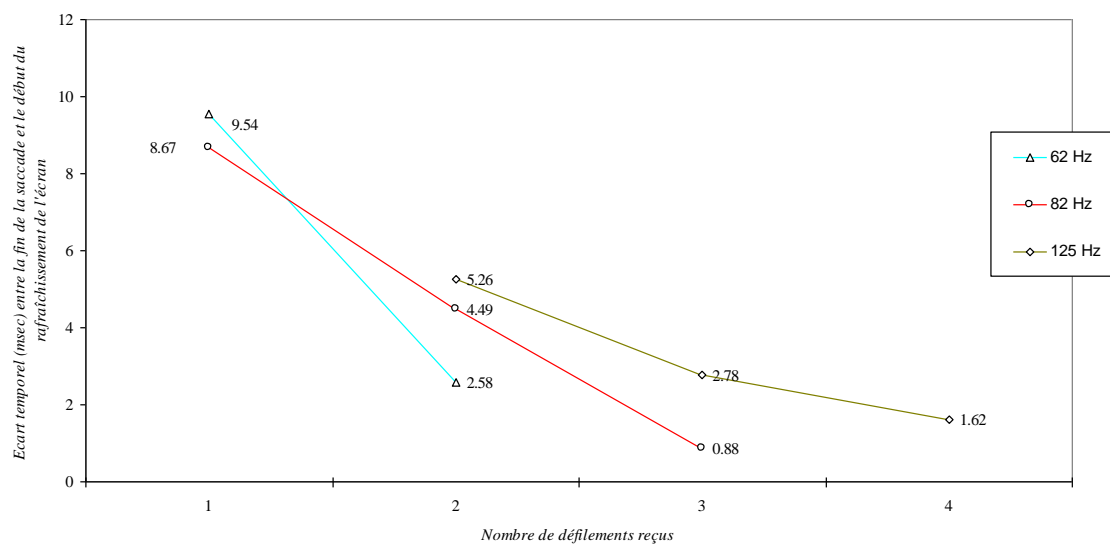
Courbes des vitesses instantannées moyennes pour les saccades recevant 3 rafraîchissements, à 82 et 125 Hz



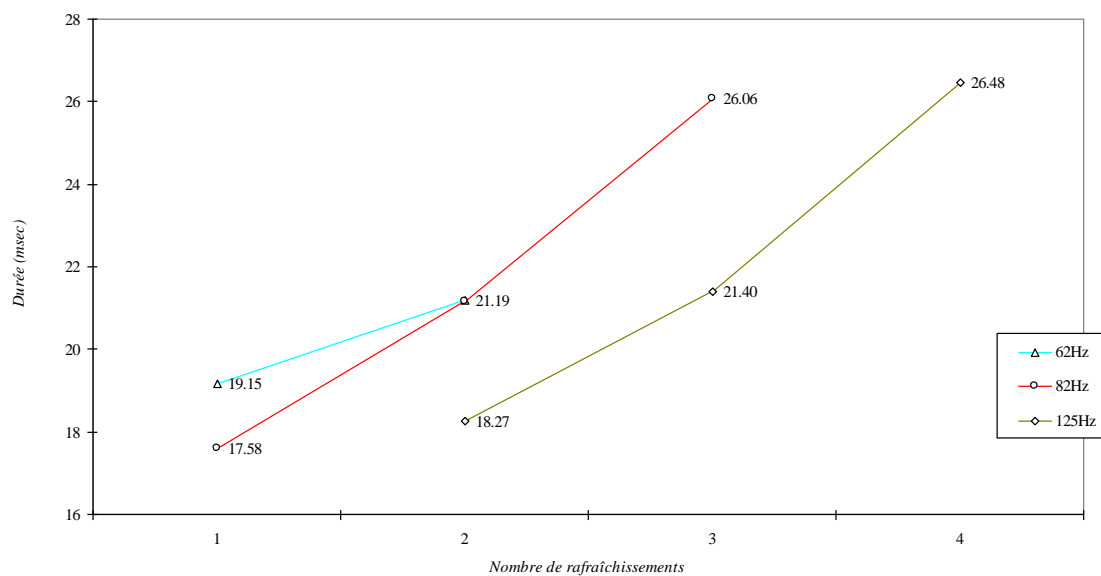
Effet de synchronisation du début de la saccade avec le passage du faisceau d'électrons au niveau du stimulus affiché, en fonction de la fréquence et du nombre de rafraîchissements reçus durant le mouvement



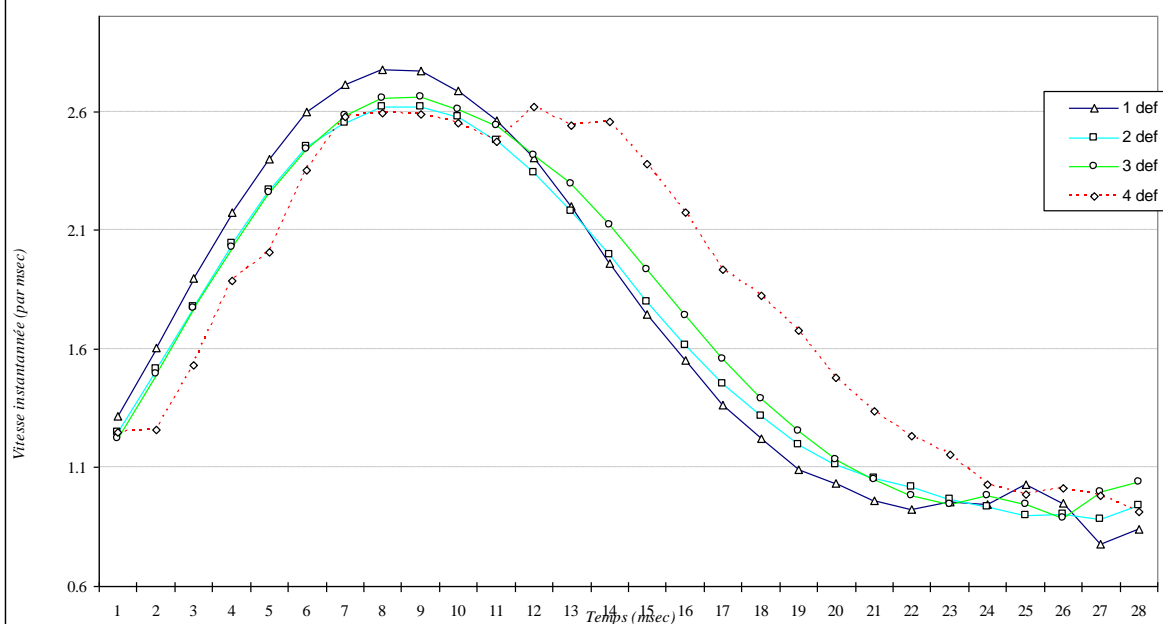
Effet de synchronisation du début de la saccade avec le début du rafraîchissement de l'écran, en fonction de la fréquence et du nombre de rafraîchissements reçus durant le mouvement



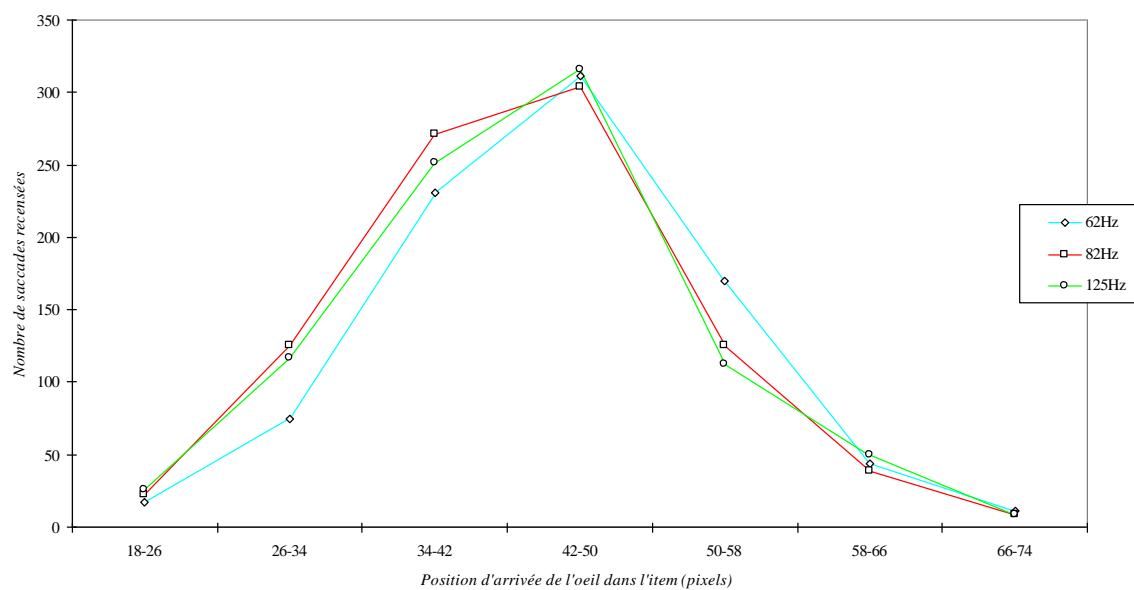
Durée des saccades en fonction de la fréquence et du nombre de rafraîchissements de l'image au cours du mouvement



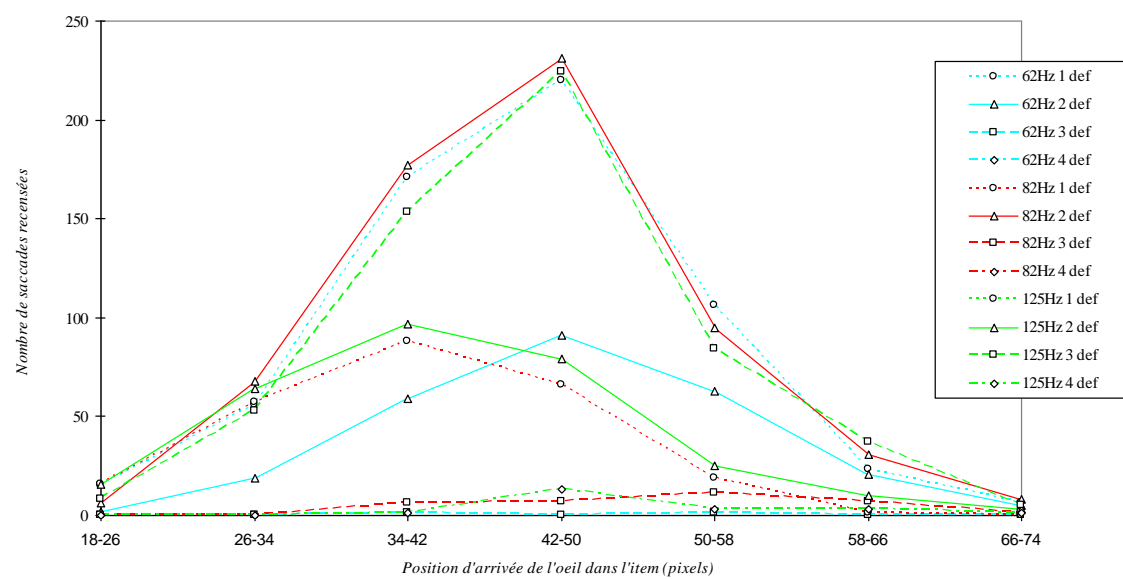
Courbes des vitesses instantannées moyennes selon le nombre de défilements reçus pendant la saccade



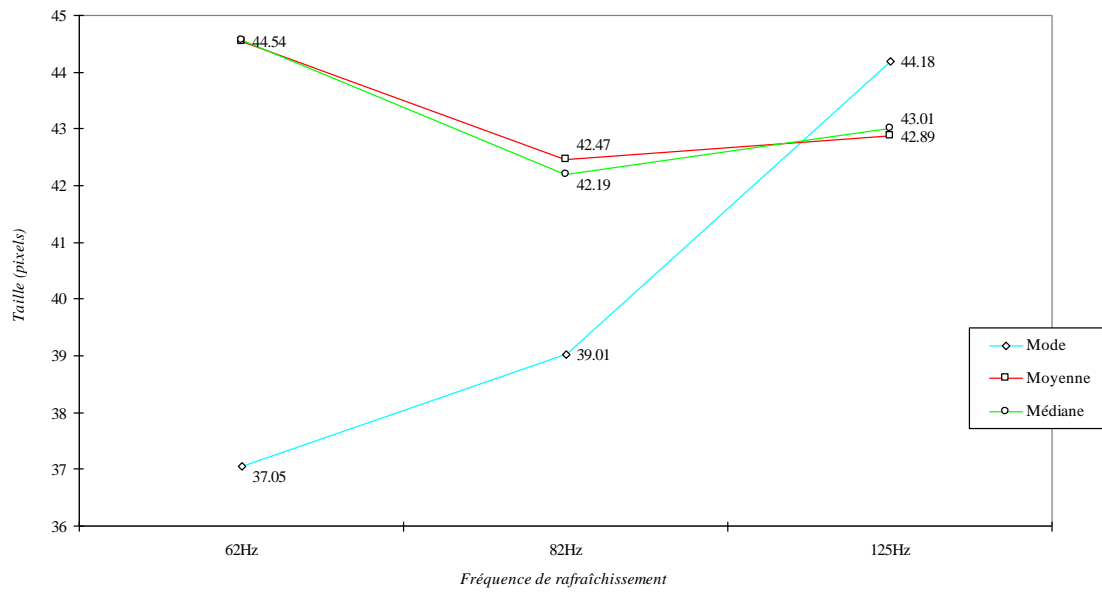
Position d'arrivée de l'oeil dans l'item en fonction de la fréquence de rafraîchissement de l'écran utilisée



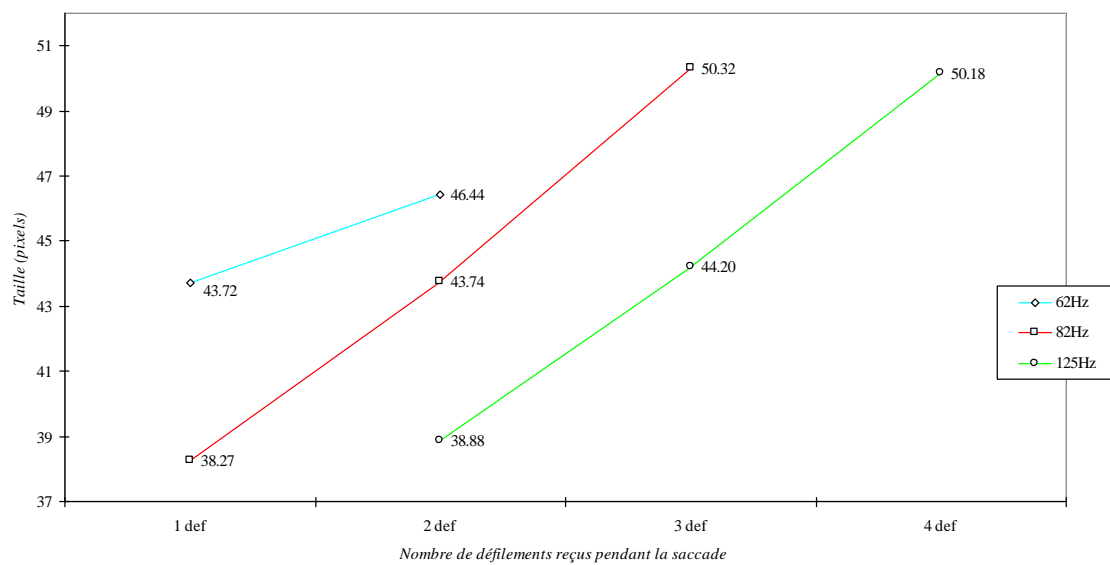
Position d'arrivée de l'oeil dans l'item en fonction de la fréquence et du nombre de rafraîchissements reçus pendant le mouvement



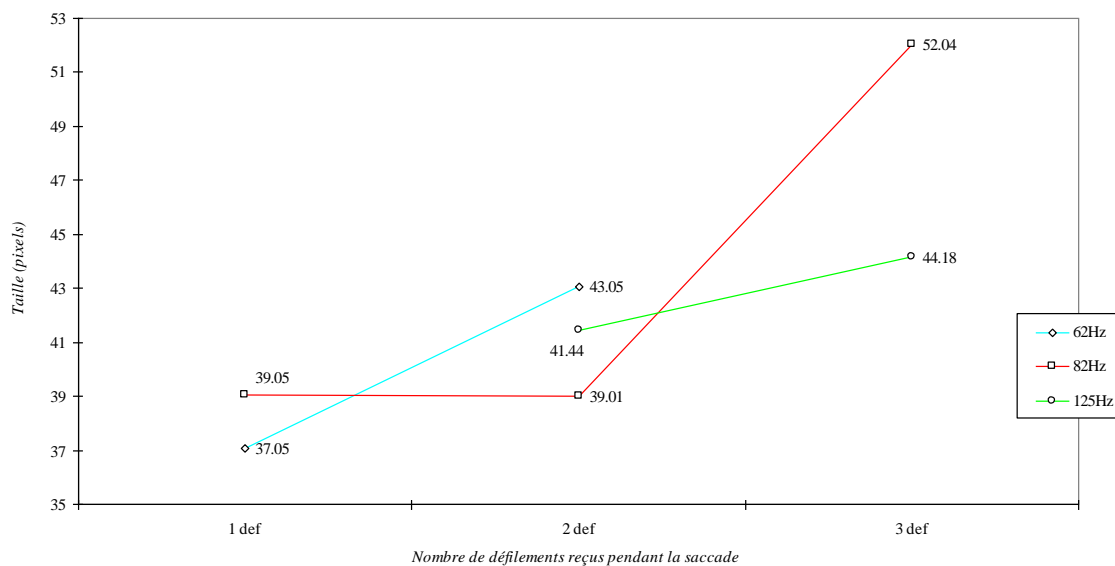
Mode, moyenne et médiane de la distribution des tailles des saccades en fonction de la fréquence de rafraîchissement de l'écran



Moyennes de la taille des saccades en fonction de la fréquence de rafraîchissement de l'écran et du nombre de défilements reçus pendant le mouvement



Modes des distributions de la taille des saccades en fonction de la fréquence de rafraîchissement de l'écran et du nombre de défilements reçus pendant le mouvement



Médianes des distributions de la taille des saccades, en fonction du nombre de défilements reçus pendant le mouvement et de la fréquence de rafraîchissement de l'écran

